



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**STUDIUM VLIVU MEZERY NA VLASTNOSTI LASEREM  
PROVEDENÉHO TUPÉHO SVARU**

STUDYING THE EFFECT OF THE GAP ON THE PROPERTIES OF LASER BUTT WELDS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Matyáš Holub**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**

**BRNO 2016**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Matyáš Holub**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Studium vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Zjistit jaký má vliv mezera mezi svařovanými plechy na mechanické vlastnosti tupého svaru při laserovém svařování

### **Cíle diplomové práce:**

- Osvojit si základy technologie laserového svařování.
- Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
- Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.
- Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.

### **Seznam literatury:**

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavatelství STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

HOLUB Matyáš: Studium vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru

---

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru. Pro experiment byla vybrána běžná ocel DC01 a korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (1.4301) s různými tloušťkami. Svařovací parametry v závislosti na mezeře mezi svařovanými plechy zůstávají konstantní. V experimentální části byly vzorky svařené pomocí Yb:YAG laseru a porovnány na zkoušce tahem, makrostruktury, mikrostruktury a tvrdosti dle Vickerse. V závěru diplomové práce jsou vyvozeny výsledky experimentu.

### Klíčová slova

laser, svařování, na tupo, tepelně ovlivněná oblast, mezera

## ABSTRACT

HOLUB Matyáš: Studying the effect of the gap on the properties of laser butt welds

---

This thesis studies the impact of gaps on the properties of laser butt weld performed. For experiment was chosen DC01 ordinary steel and stainless steel X5CrNi18-10 (1.4301) with different thicknesses. The welding parameters depending on the gap between the welded plates remain constant. In the experimental part of the samples were welded using the Yb:YAG laser and compared to the tensile test, macrostructure, microstructure and Vickers hardness. At the end of the thesis are drawn experimental results.

### Key words

laser welding, butt welding, heat affected area, the gap

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLUB, Matyáš. *Studium vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru*. Brno, 2016. 62s, 1 příloha, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 25.5.2016

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji svému vedoucímu práce panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za bezproblémovou komunikaci, za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D., Ing. Petru Horníkovi, Vojtěchu Řiháčkovi za uskutečnění mechanických zkoušek. V neposlední řadě chci poděkovat mé rodině, která mi byla oporou po celou dobu studia.

# **OBSAH**

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

<b>ÚVOD</b>	10
<b>1 STÁVAJÍCÍ STAV</b>	11
1.1 Tailored blanks	11
<b>2 PRŮMYSLOVÉ LASERY</b>	14
2.1 Základní typy laserů	15
2.1.1 Pevnolátkové lasery	16
2.1.2 Plynové lasery	19
2.1.3 Polovodičové lasery	21
2.2 Laser ve strojírenských aplikacích	21
2.2.1 Řezání	22
2.2.2 Navařování	24
2.2.3 Kalení	25
2.2.4 Označování povrchu	26
2.3 Interakce laseru s materiálem	26
<b>3 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ</b>	28
3.1 Princip laserového svařování	28
3.2 Svařovací režimy	29
3.3 Parametry ovlivňující proces svařování	29
3.4 Svařovací hlava	30
3.5 Typy laserových svarů	31
3.6 Svarové vady	33
<b>4 ZKOUŠKY MATERIÁLŮ A SVARŮ</b>	36
4.1 Zkouška tahem	36
4.2 Metalografické šetření	38
4.2.1 Makrostrukturní rozbory	38
4.2.2 Mikrostrukturní rozbor	38
4.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	39

<b>5</b>	<b>EXPERIMENT .....</b>	<b>41</b>
5.1	Volba materiálu .....	41
5.2	Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálů .....	42
5.3	Příprava a svařování vzorků .....	43
5.4	Zkouška tahem .....	46
5.5	Metalografické šetření .....	53
5.6	Měření tvrdosti dle Vickerse .....	58
<b>6</b>	<b>TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚRY .....</b>	<b>62</b>

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh



## ÚVOD [2], [38]

Laserové technologie se v poslední době dostávají čím dál více do nejrůznějších odvětví průmyslu. Laserové svařování vysoce převyšuje vlastnosti svaru v porovnání s konvenčními metodami svařování jako je MIG, MAG a TIG. Hlavními výhody laserového svařování jsou: vysoká svařovací rychlost, malá tepelně ovlivněná oblast, svařování bez přídavného materiálu.

Při svařování plechů na tupo je nutné co nejpřesněji sestavit plechy tak, aby nevznikla mezera. Vzniklé odchylky se mohou projevit ve vadách svarového spoje.

Základní myšlenkou této práce je získat informace o tom, jaký vliv na mechanické vlastnosti má mezera při laserovém svařování plechu na tupo. Svařování plechů se týká zejména automobilového průmyslu. Karoserie automobilu je svařenec složený z plechových výlisků. Dosavadní technologie svařování je odporovým bodovým svařováním. Laserem provedené svary mají pozitivní vliv na tuhost karoserie.

Výlisky nemusí být vždy ideálně přesné, proto při svařování výlisků může vzniknout mezera mezi svařovanými materiály. V současné době nejsou při svařování karoserií žádná čidla, která by odhalila, že je při svařování něco v nepořádku a přerušila nebo zpomalila provoz. Cílem je vyhodnotit vliv mezery na kvalitu laserem provedeného tupého svaru.



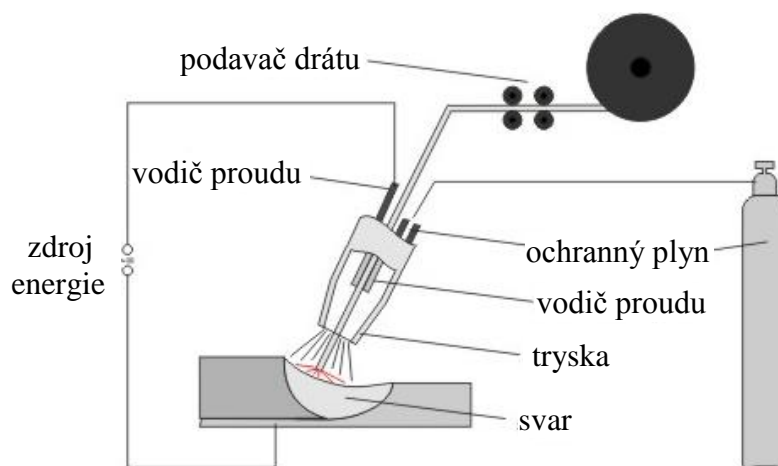
Obr. 1 Svařování karoserie automobilu [38]

## 1 STÁVAJÍCÍ STAV [27], [31], [36], [45]

V současné době jsou běžnými metodami svařování plechů na tupo metody: MIG, MAG a WIG. Tyto metody mají v průmyslu své místo. Metoda svařování závisí především na svařovaném materiálu. Pro experiment byl vybrán materiál DC 01 a korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (1.4301).

Metoda MAG neboli Metal Active Gas je nejpoužívanější metou v průmyslu zejména v poloautomatickém nebo automatickém režimu. Jde o svařování v ochranné atmosféře oxidu uhličitého tavnou elektrodou. Ochrana svařovací lázně je prováděna pomocí aktivního plynu, a proto plyn vstupuje do chemických reakcí. Metoda je vhodná pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných i vysokolegovaných ocelí a k navařování oceli.

Metoda MIG, neboli Metal Inert Gas, svařování v ochranné atmosféře argonu tavnou elektrodou. Povrch tavné lázně je chráněn inertním plynem, a proto plyn nevstupuje do chemických reakcí. Metoda je vhodná pro svařování hliníku, mědi a titanu. Svařovací zařízení pro metodu MAG/MIG je stejné, mění se pouze ochranný plyn, popřípadě svařovací drát.



Obr. 2 Svařování karoserie automobilu [27]

Metoda WIG, neboli Wolfram Inert Gas, je známá také pod označením TIG, neboli Tungsten Inert Gas. Jedná se o svařování v ochranné atmosféře argonu netavnou elektrodou. Netavná elektroda je buď z čistého wolframu, nebo s přidávkou oxidu thoriumu. Svařuje se zpravidla ručně. Tenké plechy lze svařovat bez přídavního materiálu. Metoda je vhodná pro svařování hliníku, hořčíku, mědi, titanu a korozivzdorných ocelí.

Pro experiment byla vybrána metoda laserového svařování. Laserové svařování je progresivní metoda, která nese řadu výhod. Hlavními výhodami laserového svařování jsou: vysoká rychlost svařování, svařování bez přídavních materiálů a velmi malá tepelně ovlivněná oblast.

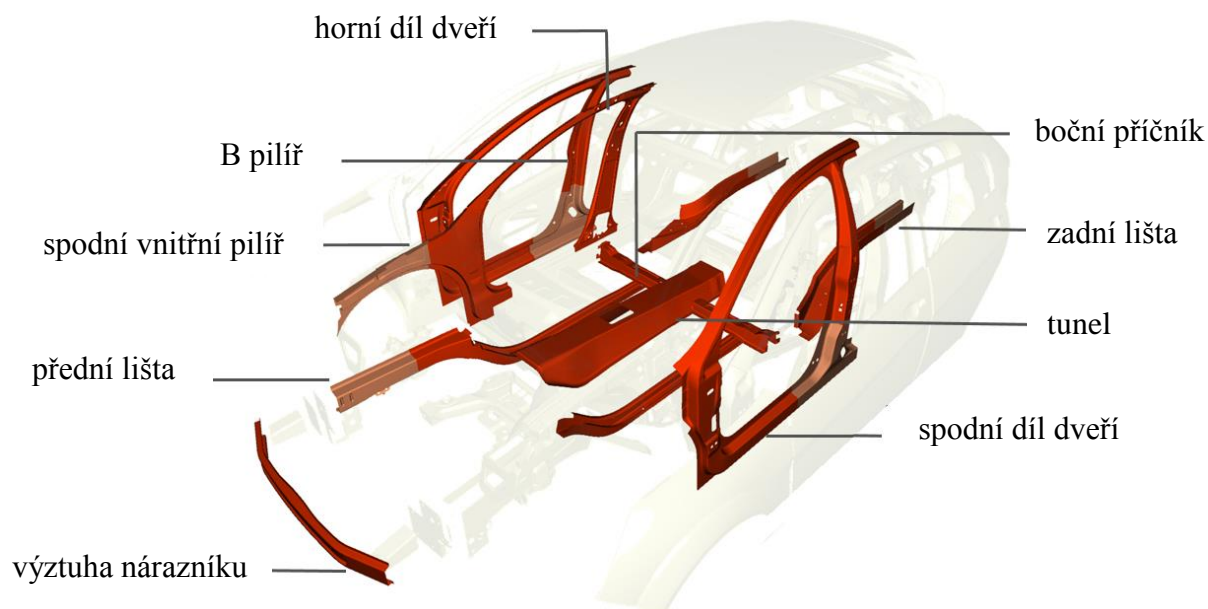
Cílem této práce je provést experiment laserového svařování plechů na tupo s různými mezerami. Předpokládá se, že mezera mezi svařovanými plechy bude mít největší vliv na kvalitu svaru u tenkých plechů. Čím větší bude tloušťka plechu, tím větší může být mezera mezi plechy při svařování, aniž by to ohrozilo kvalitu svaru a jeho vlastnosti. Svařené vzorky se podrobí mechanickým zkouškám. V závěru práce bude popsán experiment podrobněji a porovnány získané výsledky zkoušek. Experiment bude proveden na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky.

### 1.1 Tailored blanks [45]

Technologie lisování polotovárů svařených ze dvou a více materiálů rozdílných vlastností se nazývá Tailored blanks. Z důvodu vývoje vedoucího ke snížení hmotnosti a ceny karoserie automobilů, výlisky nemusí mít stejnou tloušťku ani vlastnosti materiálu.

Tailored blanks lze přeložit jako "přístihy vyráběné na míru". Jde o polotovary svařené

ze dvou a více materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Příklad náhrady klasického přístřihu plechu přístřihem tailored blanks je na obrázku níže. Materiály mohou mít rozdílnou pevnost, rozdílnou tloušťku nebo rozdílnou povrchovou úpravu. Užitím polotovarů tailored blanks dochází ke snížení hmotnosti a ceny karoserie. Na druhou stranu jsou kladeny vyšší požadavky na nástroje, což se promítne ve vyšší ceně nástrojů.



Obr. 3 Díly karoserie automobilu - tailored blanks [45]

Při výrobě tailored blanks se používá buď švové, nebo laserové svařování. Výhodnější z technologií je svařováním laserem. Tato technologie vytváří svary, u nichž svarová housenka nepřesahuje základní materiál, čímž odpadají problémy vznikající při lisování švově svařených tailored blanks. Pro svařování se nejčastěji používají plynové nebo pevnolátkové lasery.

- o 14% lehčí
- o 11% levnější



USIBOR 1500P 1,8 mm

DUCTIBOR 500P 1,5 mm

Obr. 4 Ukázka úspory na B pilíři karoserie automobilu - tailored blanks [45]

Laserové svařování postupně nachází své uplatnění při svařování v automobilovém průmyslu. Je to především kvůli vysokým svařovacím rychlostem. Dalšími výhodou je svar s malou deformací, malou tepelně ovlivněnou zónou a především vyšší pevností. Laserem provedené svary po celém obvodu výlisku se liší od bodových odporových svarů

nárůstem tuhosti celé karoserie, což je velice příznivé. Nevýhodou technologie svařování laserem je citlivost na slícování svařovaných hran součástí.

Svařování tailored blanks pomocí laseru spočívá ve svařování plechů na tupo, po svaření následuje tváření. Prozatím není řízení optiky takové, které by rozpoznalo, že plechy nejsou dokonale slícované. Vzniklá mezera mezi plechy při svařování má vliv na kvalitu a vlastnosti provedeného svaru. To, jakým způsobem je ovlivněna kvalita a vlastnosti svaru vznikem mezery při svařování na tupo, je cílem této práce.



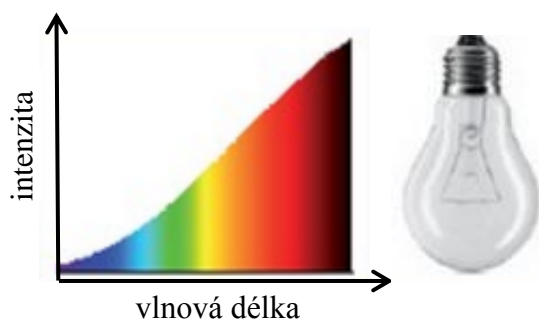
## 2 PRŮMYSLOVÉ LASERY [1], [4], [5], [12], [13], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [24], [28], [29], [32], [33], [34], [39], [40], [44], [47], [49], [52], [53], [54]

Laser je zkratka vytvořená ze začínajících písmen anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu znamená „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Slovo záření můžeme nahradit slovem foton. Foton je elementární částicí světla.

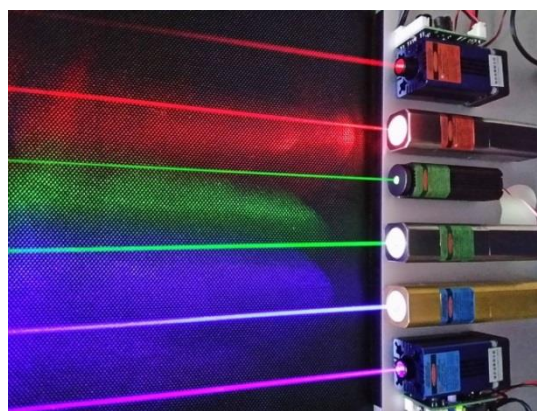
Základním principem laserového paprsku je rozdíl od přirozených zdrojů světla. U přirozených zdrojů světla se záření šíří rovnoměrně všemi směry, ale světlo vycházející z laseru je ve formě úzkého paprsku o malém průměru. Pod pojmem klasický zdroj světla si můžeme představit žárovku. V tabulce níže je porovnání klasického zdroje světla a laseru.

Tab. 1 Porovnání klasického zdroje světla a laseru. [54]

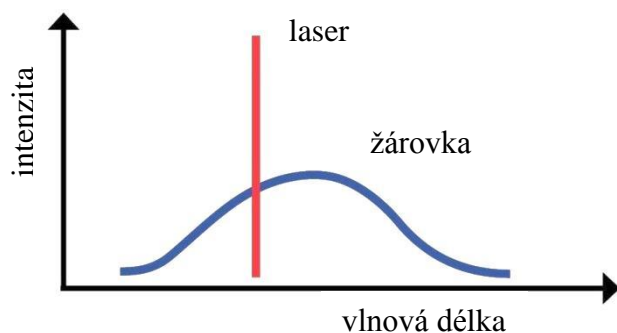
Klasický zdroj světla	Laser
Záření se šíří rovnoměrně do celého prostoru	Záření vychází ve formě úzkého paprsku o malém průměru
Záření je barevné (mnoho vlnových délek)	Paprsek je jednobarevný (monochromatický)
Jednotlivé světelné vlny nejsou synchronizovány	Vychází jen jedna synchronizovaná vlna
Zaostření do plošky	Zaostření svazku do bodu



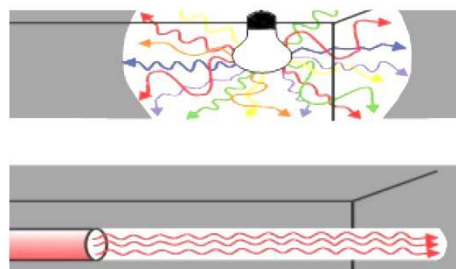
Obr. 5 Barevné spektrum žárovky [44]



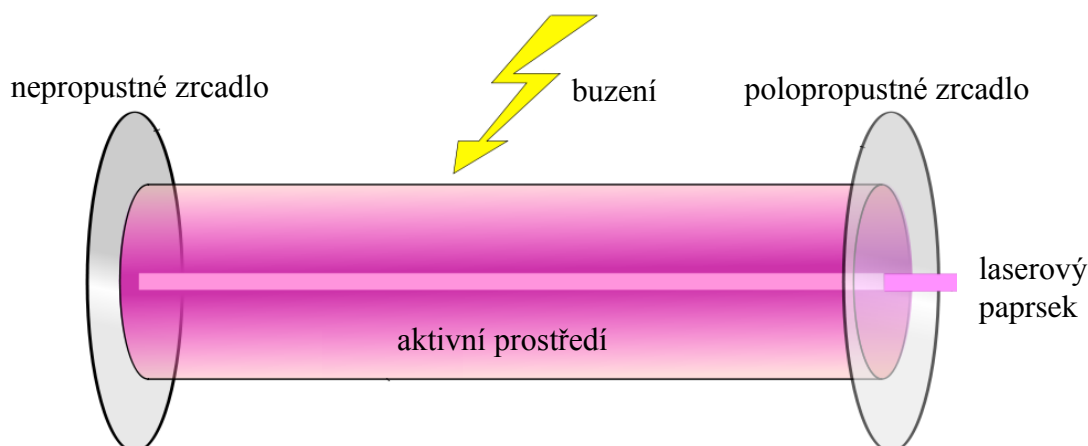
Obr. 6 Jednobarevný paprsek laseru [13]



Obr. 7 Porovnání vlnové délky a šíření vln žárovky a laseru [15]

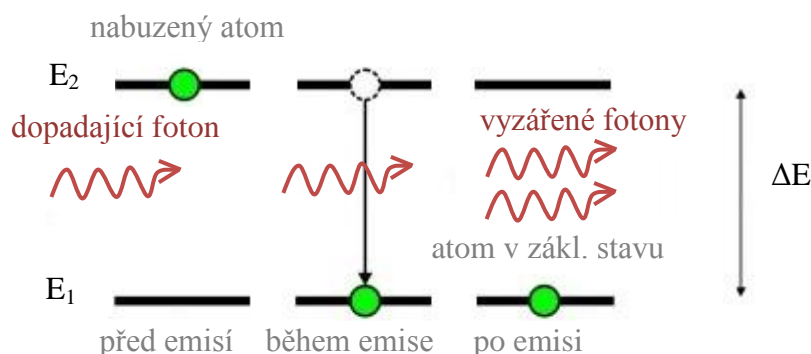


Laserové zařízení se skládá ze tří základních částí. První částí je aktivní prostředí. Aktivní prostředí může být různé. Atomy, ionty a molekuly plynů, polovodiče, kapaliny a pevné látky. Druhou částí je buzení, které je závislé na typu aktivního prostředí. Buzení probíhá například elektrickým výbojem, zářením laserové diody, optickým zářením nebo také zřídka chemickou reakcí. Třetí část je optický rezonátor, který se nejčastěji skládá ze dvou rovnoběžných zrcadel, nepropustného a polopropustného. Energie získaná buzením je v optickém rezonátoru pomocí procesu stimulované emise přeměněna na laserový paprsek. Základní konstrukce laseru je na obrázku níže.



Obr. 8 Základní konstrukce laseru [33]

Aktivní prostředí obsahuje element, nejčastěji atom, který při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu vyzáří foton. Tento zářivý přechod se děje spontánně. Prostředí má vždy být ve stavu termodynamické rovnováhy, tedy s co nejnižší energií. Buzením je tento stav porušen, aktivní prostředí se dostane do vybuzeného stavu. Procesem stimulované emise se energie dodaná aktivnímu prostředí přemění na laserový svazek. Foton dopadající na vybuzený atom způsobí jeho přechod z horní energetické hladiny na dolní energetickou hladinu a při tom dojde k emisi dalšího fotonu. Fotony putují rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému a rapidně narůstá jejich počet. Energie proudu fotonů neustále roste až do hodnoty, kdy projde polopropustným zrcadlem. Základní princip stimulované emise je na obrázku níže.



Obr. 9 Princip stimulované emise [53]

## 2.1 Základní typy laserů [24], [54]

Rozdělení laserů je možné z různých hledisek a je uvedeno níže. Vývoj přinesl množství typů laserů s různými vlastnostmi, které jsou vhodné pro různé technické aplikace.

Podle druhu aktivního prostředí

- pevnolátkové
- plynové
- kapalinové

Podle režimu provozu

- pulzní
- kontinuální

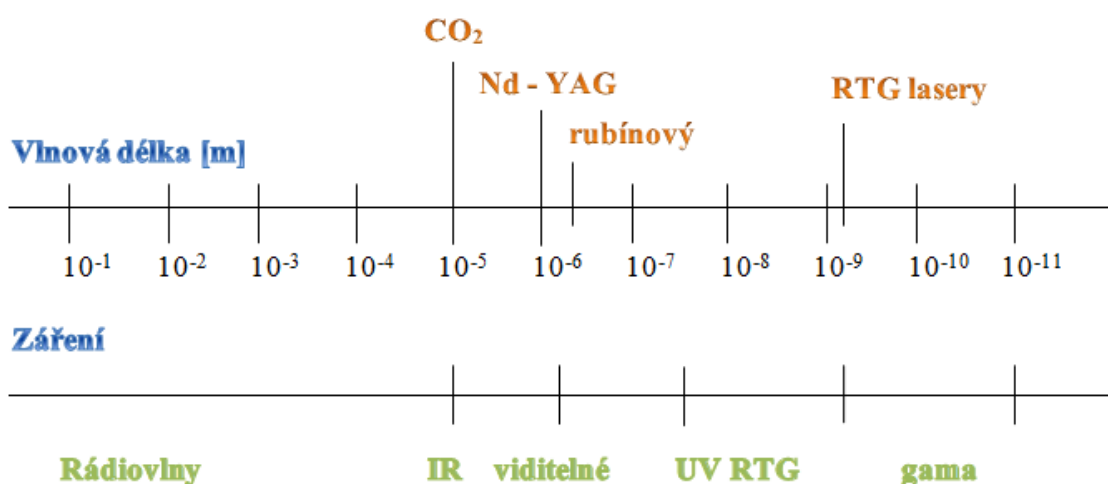
Podle typu čerpání energie k buzení

- elektrický výboj
- optické čerpání
- chemickou reakcí
- tepelnou změnou
- rekombinací

Další rozdělení

- tyčové
- diskové
- vláknové
- polovodičové

Další možností rozdělení laserů je podle vlnových délek, které je zobrazeno na obrázku níže.



Obr. 10 Rozdělení laserů podle vlnových délek záření [24]

### 2.1.1 Pevnolátkové lasery [22], [24], [29], [47], [49], [53]

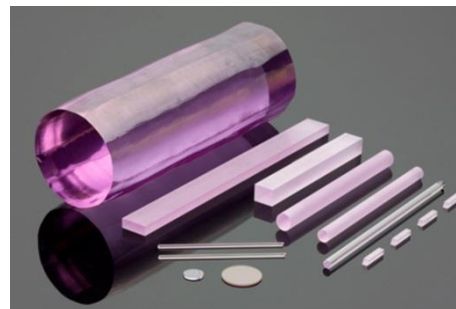
Aktivním prostředím pevnolátkového laseru je dielektrikum, neboli pevná opticky propustná látka. Základním materiálem, který určuje většinu technických vlastností daného krystalu, je u pevnolátkových laserů matrice. Musí být průzračná, opticky homogenní a musí být technologicky možné ji uměle vyrábět. Materiály, které splňují tyto požadavky, jsou:

- krystaly,
- skla,
- keramika.

Matrice obsahuje poměrně malou koncentraci stechiometricky uložených iontů aktivátoru. Všechna aktivní prostředí pevnolátkových laserů jsou současně účinnými luminofory, což jsou látky schopné pohlcovat energii a následně ji vyzařovat ve formě světla. Nejznámějšími reprezentanty pevnolátkových laserů jsou:

- rubínový laser – použití především v pulzním režimu, je vhodný pro vrtání tvrdých materiálů, nyní se nahrazuje Nd:YAG laserem, pracuje na vlnové délce 694 nm,
- Nd:sklo laser – pracuje v pulzním režimu, vlnová délka 1064 nm,
- Nd:YAG laser - dnes nejvíce používaným typem pevnolátkového laseru, pracuje na vlnové délce 1064 nm.

Nd:YAG laser patří do skupiny pevnolátkových laserů. Aktivním prostředím je krystal, sloučenina  $Y_3Al_5O_{12}$  - yttrium aluminium granát dopovaný Nd - neodymem. Vlnová délka laserového svazku je 1,064  $\mu m$ , a výkon je v rozmezí desítek W až 16 kW. Laser může pracovat v kontinuálním i pulzním režimu. Hlavní výhodou celé skupiny Nd:YAG laserů je možnost použití optického vlákna na vedení paprsku, využití je zejména u svařecích robotů. Optické vlákno si lze představit jako pryžovou hadici o průměru zhruba 10 mm, která může mít libovolnou délku a lze ji ohýbat. Nd:YAG lasery lze rozdělit do několika generací.



Obr. 7 Krystaly Nd:YAG [52]

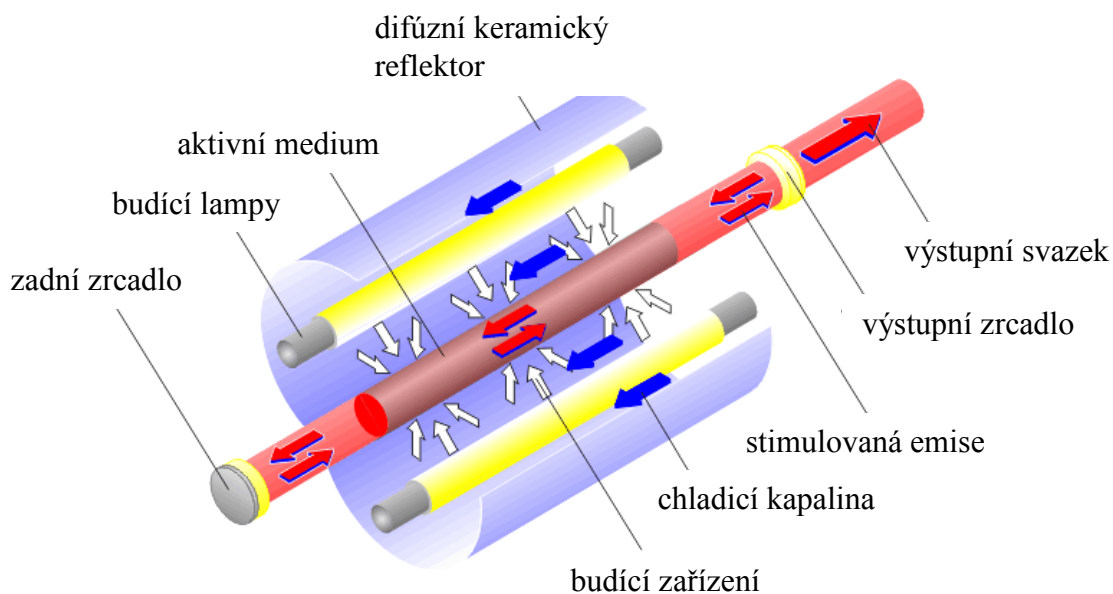
První generace laserů je buzená výbojkami. Výhody těchto laserů jsou velká energie v pulzu a nízká investiční náročnost. Naopak mezi nevýhody patří nízká účinnost, nutnost chlazení a dražší provoz díky časté výměně výbojek. Tyto lasery se používají na svařování a vrtání.

Výhody:

- Velká energie v pulzu
- Nízké investiční náklady
- Možnost použití optického vlákna pro vedení paprsku

Nevýhody:

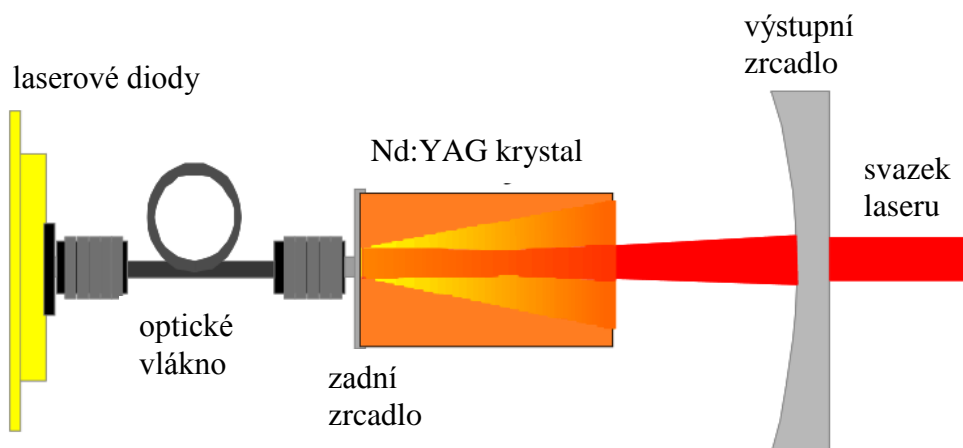
- Nízká účinnost
- Nutnost chlazení
- Častá údržba
- Vysoké provozní náklady



Obr. 11 Princip Nd: YAG laseru první generace [4]



Druhá generace je buzená polovodičovými diodami. Lasery o nižším výkonu jsou používány při značení a gravírování a výkonnější lasery se využívají na řezání a svařování. Tento typ laserů je postupně nahrazován vláknovými pulzními lasery, které nabízejí v podstatě pouze výhody.



Obr. 12 Diodami buzený Nd: YAG laser [5]

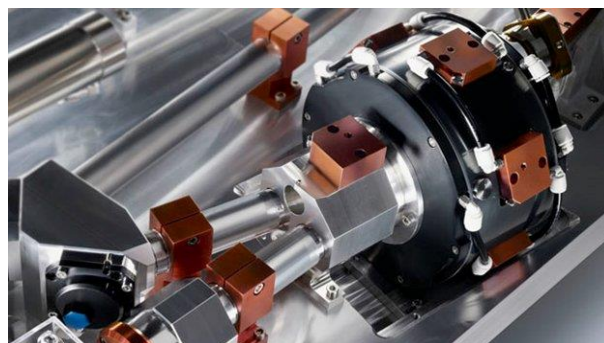
Výhody:

- Nižší provozní náklady
- Delší životnost
- Vyšší účinnost
- Nižší nároky na chlazení
- Možnost použití optického vlákna pro vedení paprsku

Nevýhody:

- Vysoké investiční náklady

Třetí nejmodernější generací v této skupině je diskový laser, který má aktivní prostředí ve tvaru tenkého disku. Vysoký výkon dosahuje až 16 kW. V porovnání s vláknovými lasery mají diskové lasery menší životnost a účinnost pohybující se kolem 15 až 20 %. Použití diskových laserů je v oblasti náročnějších výkonových operací, například svařování a řezání.



Obr. 13 Rezonátor diskového laseru [5]

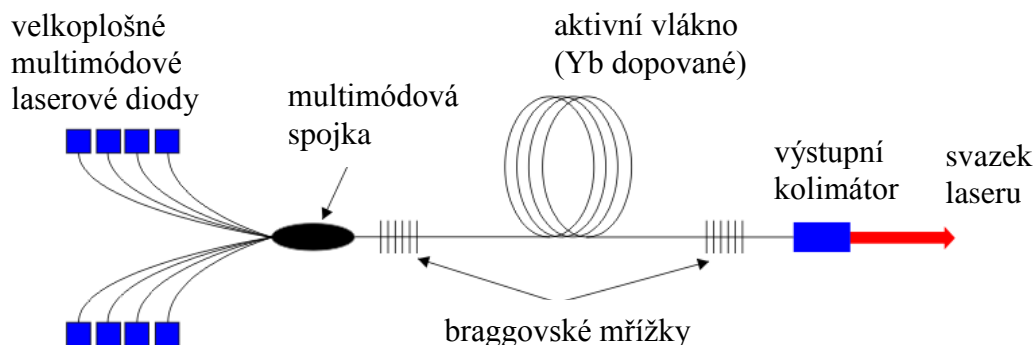
Výhody:

- Kompaktnější konstrukce
- Vysoký výkon
- Vyšší účinnost
- Dobrá kvalita výstupního paprsku
- Možnost použití optického vlákna pro vedení paprsku

Nevýhody:

- Vysoké investiční náklady
- Nižší životnost než vláknové lasery
- Nižší účinnost než vláknový laser

Vláknové lasery jsou technologicky nejmodernějšími představiteli pevnolátkových laserů. Aktivní prostředí je dlouhé optické vlákno dopované ytterbiem. Buzení z laserových diod je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna. Zrcadla jsou nahrazena tzv. Braggovskými mřížkami, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákně. Záření je poté z optického vlákna vyvázáno pomocí optického kolimátoru. Vlnová délka laseru je  $1,07\ \mu\text{m}$ . Princip vláknového laseru je znázorněn na obrázku níže.



Obr. 14 Princip vláknového laseru [5]

Hlavní výhodou vláknového laseru je jeho jednoduchost. Robustnost a modularita je u těchto laserů unikátní. Laser je tvořen tzv. laserovými moduly, jejichž spojováním se může postupně navyšovat výkon až do 100 kW. Vysoká účinnost 30 až 35% a obrovská životnost, která je až 100 000 hod řadí laser na špičku. Malé prostorové nároky. Nejnížší provozní náklady ze všech uvedených typů a téměř nulové nároky na údržbu.

Výhody:

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| - Výborná kvalita svazku | - Nízké provozní náklady |
| - Modularita             | - Vysoký výkon           |
| - Kompaktnost            | - Nízké nároky na údržbu |

Nevýhody:

- Vysoká pořizovací cena

### 2.1.2 Plynové lasery [4], [24], [34], [54]

Plynové lasery tvoří významnou skupinu, která má velmi široké využití. Jako aktivní látka laseru je využit plyn, nebo směs plynů a par. Pracují v kontinuálním i impulzním režimu. V kontinuálním režimu pracují s výkonem od mW až po desítky kW. V impulzním režimu dosahují maximální výkony stovky W. Typickým představitelem skupiny je  $\text{CO}_2$  laser.

$\text{CO}_2$  laser patří mezi molekulové lasery. V současné době jsou  $\text{CO}_2$  lasery velmi perspektivní.  $\text{CO}_2$  lasery emitují světlo s vlnovou délkou  $10,6\ \mu\text{m}$  a mají energetickou účinnost asi 10 až 15 %. Výkon paprsku může dosahovat až 30 kW. Plynová směs  $\text{CO}_2$  laseru se skládá zejména z helia, které zabraňuje rozptylu tepla, dusíku, který je potřebný k vytváření energie nepostradatelné k nabuzení a oxidu uhličitého. U  $\text{CO}_2$  laserů je známo, že vysoké procento elektrické energie se přemění v teplo. Asi 85 až 90% elektrické energie se přemění v teplo. Rozptylu tepla je dosaženo použitím tepelných výměníků. Hlavní nevýhodou  $\text{CO}_2$  laseru je nutnost dopravit paprsek do místa záření



Obr. 15 Optické čočky [32]

pomocí systému zrcadel. Další nevýhodou jsou poměrně drahé optické čočky, které jsou na CO<sub>2</sub> laseru často potřeba čistit nebo vyměnit.

Vzhledem k vysokým výkonům si CO<sub>2</sub> lasery drží své místo v technologiích řezání a svařování. CO<sub>2</sub> lasery s výkonem do 500 W se používají pro značení materiálů. Lasery středního výkonu od 500 do 6000 W mají uplatnění pro řezání ocelových plechů. Lasery s výkonem nad 6000 W se používají na svařování, použití je zejména v automatizované sériové výrobě.

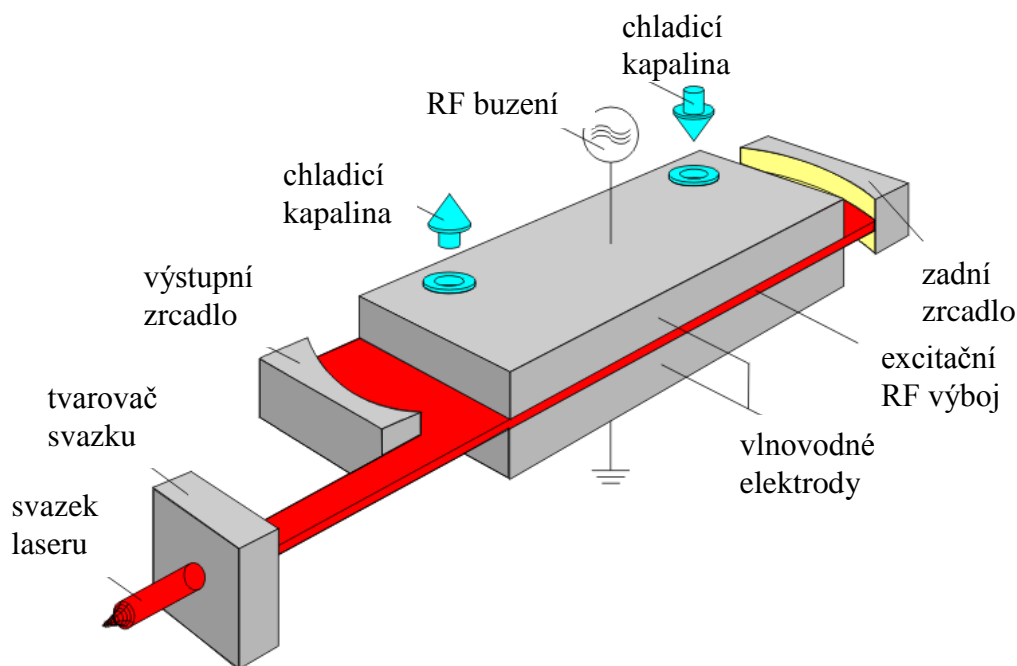
Výhody:

- Vysoká spolehlivost
- Dlouhá životnost
- Nízké provozní náklady
- Vysoký výkon

Nevýhody:

- Častá údržba a kontrola
- Nastavování zrcadel
- Nutný odvod tepla
- Vlnová délka

Nejnovějším typem CO<sub>2</sub> laseru je difúzně chlazený deskový SLAB laser. Charakteristické je vysokofrekvenční buzení při velkoplošných měděných elektrodách a vysoce kvalitní laserový paprsek. K odvodu tepla dochází rozptylem na vodou chlazených elektrodách. Laser nepotřebuje stálý vnější zdroj plynové směsi, protože obsahuje zásobník o objemu 10 l, který je dostatečný pro přibližně rok nepřetržitého provozu. Náklady se tedy značně redukuje na údržbu i servis. Novější konstrukce rezonátoru má vliv na zmenšení rozměrů zdroje u vyšších výkonů. Základní princip SLAB laseru je na obrázku níže.



Obr. 16 Základní princip SLAB laseru [4]

Výhody:

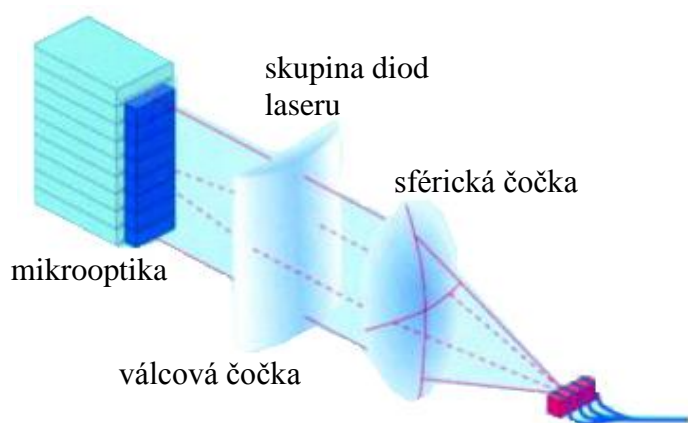
- Vysoká kvalita paprsku
- Nízká spotřeba plynů
- Nízká spotřeba energie
- Novější konstrukce rezonátoru, nejsou pohyblivé části

Nevýhody:

- Výkon do 5 kW

### 2.1.3 Polovodičové lasery [24], [54]

Aktivním prostředím polovodičových laserů je elektricky čerpaná polovodičová dioda. Vlnová délka laseru je mezi 800 až 980 nm. Výkon laserového paprsku je udáván v rozmezí 50 W až 6 000 W. Laser pracuje pouze v kontinuálním pracovním režimu. Výhodou polovodičového laseru je vysoká účinnost, která je 50 až 60 %. Vysoká účinnost je především kvůli přímé přeměně elektrického proudu na záření. Laserový paprsek je veden pomocí optického vlákna. V porovnání s ostatními druhy laserů má malé rozměry a hmotnost. Přenos laserového paprsku pomocí optického vlákna, nízká hmotnost a rozměry jsou ideální pro instalaci laserů na robotická ramena. Nevýhodou polovodičových laserů je nízká kvalita výstupního svazku, hranatý profil nelze zaostřit do malého bodu. Hranatý profil výstupního svazku je při kalení naopak výhodou. Při technologii kalení odpadá tedy potřeba speciální optiky pro úpravu laserového svazku. Polovodičové lasery do výkonu 250 W se používají k řezání a svařování plastů a tenkých kovových fólií. Vyšší výkony v řádech kW se používají pro svařování, kalení, navařování kovů a plastů.



Výhody:

- Vysoká účinnost
- Malé rozměry a hmotnost
- Nízké nároky na údržbu
- Paprsek vhodný pro kalení

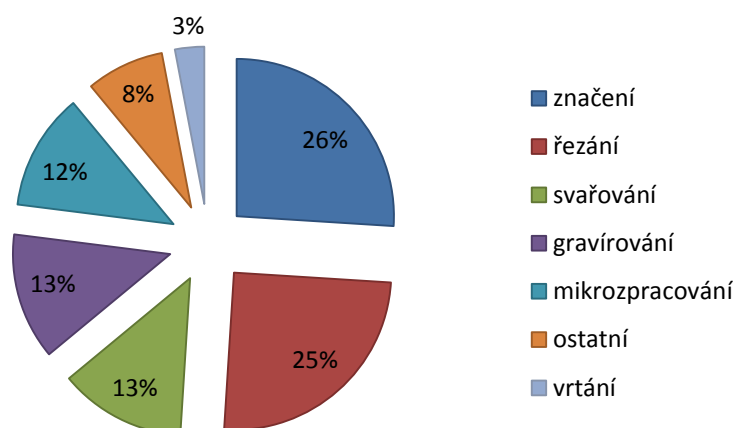
Nevýhody:

- Nízká kvalita paprsku
- Pouze kontinuální režim

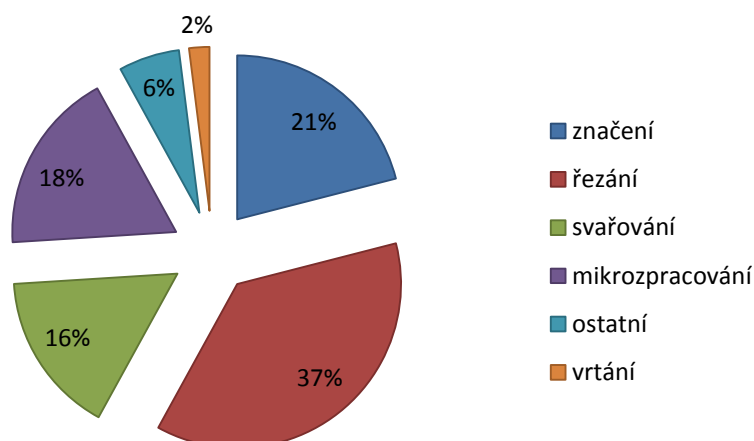
Obr. 17 Konstrukce polovodičového laseru [16]

### 2.2 Laser ve strojírenských aplikacích [24]

Při zpracování kovů se uplatňují lasery v různých průmyslových aplikacích jako je dělení, svařování, tepelné zpracování povrchu atd. Využití laseru v jednotlivých technologických oborech je zobrazeno na obrázku níže.



Obr. 18 Procentuální podíl laserových aplikací v roce 2008 [24]



Obr. 19 Procentuální podíl laserových aplikací v roce 2014 [24]

Porovnáním procentuálních podílů v roce 2008 a 2014 je patrné, že zejména technologie řezání a svařování jsou na vzestupu. Postupně rozšiřující se laserové technologie nacházejí stále více uplatnění.

### 2.2.1 Řezání [21], [24], [54]

Laserové řezání umožňuje dosahovat nejvyšší kvality zpracování, kterou nelze dosáhnout řezáním plazmou ani plamenem. Řezání laserem je jeden z nejmodernějších efektivních způsobů dělení tenkých a středně tenkých kovových materiálů. Technologie laserového řezání umožňuje získat tenké řezy vysoké kvality s minimální tepelně ovlivněnou zónou na součásti, proto se zachovávají fyzikální a chemické vlastnosti zpracovávaného materiálu a zabrání se pokřivení nebo jiným deformacím součásti. Vzhledem k technologickým vlastnostem je laserové řezání velice přesné, metoda je vhodná zejména pro řezání plechů.



Obr. 20 Laserové řezání [21]

kovu není třeba speciálního uchycení obrobku, což výrazně snižuje čas, potřebný pro výměnu zpracovávaného materiálu. Přesnost procesu řezání laserem je vyšší než mechanická metoda zpracování, protože zde nedochází k mechanickému opotřebení nástroje.

Technologie řezání kovů laserem je vhodná pro řezání velkých i malých sérií. Laserové zařízení nevyžaduje dodatečnou montáž jakýchkoliv součástí při změně konfigurace detailu a proto je tato metoda velmi flexibilní a umožňuje pokračovat v řezání bez zastavení, pouhou změnou řídicího programu. Řezání materiálu je možné po zcela libovolném obrysu. Výsledný řez je vysoce kvalitní a může být použit bez dalšího opracování. Při laserovém řezání

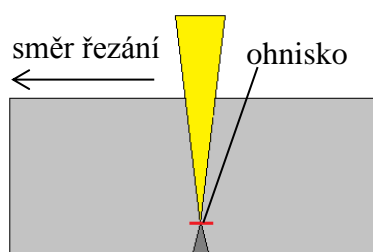


Principem metody je rovnoběžný paprsek, který je zaostřen do ohniska. Dosažená hustota výkonu je až  $10^8 \text{ W.cm}^{-2}$ . Dochází k tavení materiálu až sublimaci, difuze tepla z místa dopadu je menší než ohřev materiálu. Roztavený kov je třeba odstranit řezným plynem. Druh řezného plynu je závislý na druhu řezaného materiálu. Proudící plyn chrání fokusační optiku.

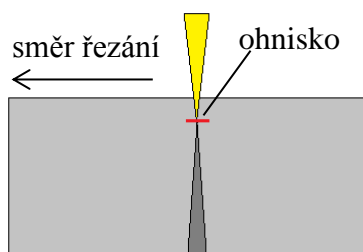
Tab. 2 Srovnání hustot energie. [54]

Metoda	Hustota energie [ $\text{W.cm}^{-2}$ ]
Laser	$10^7 - 10^9$
Plamen	$10^3$
Plasma	$10^6$
Vodní paprsek	$10^{10}$

Tavné řezání je vhodné pro dělení nerezových ocelí a barevných kovů. Roztavený kov se ze spáry odstraňuje proudem řezného plynu. Jako řezný plyn se používá dusík. Vysoký výkon laseru při nižší řezné rychlosti zaručuje kvalitní řez. Princip tavného řezání je na obr. 22.



Obr. 22 Tavné řezání [40]



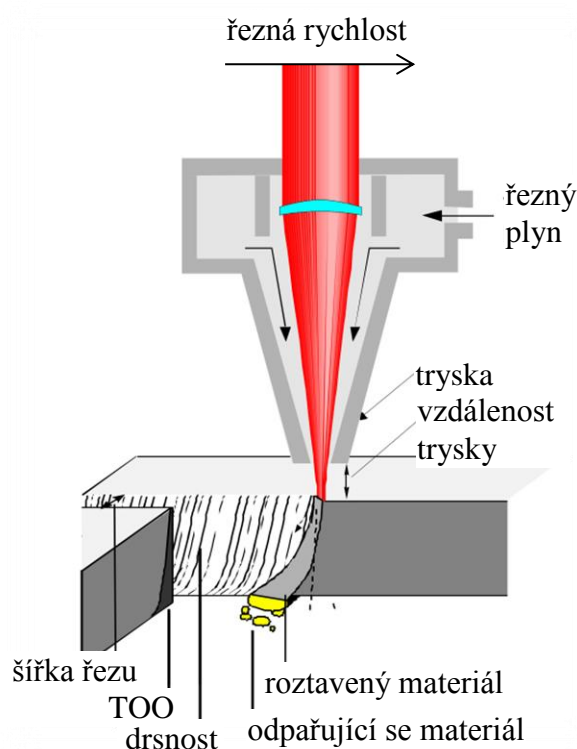
Obr. 23 Oxidační řezání [40]

Řezným plynem je kyslík. Princip oxidačního řezání je na obr. 23.

Spotřeba řezného plynu ovlivňuje cenu výrobku. Při řezání korozivzdorné oceli lze místo dusíku použít jako asistenční plyn kyslík, což přináší poměrně výraznou cenovou úsporu v řádu cca 20%. Kvalita řezu je však výrazně horší, řez je černý, zoxidovaný a drsný. Na obrázku níže je porovnání laserového řezu podle použitého řezného plynu. Horní vzorek bez okují, řezný plyn dusík. Dolní vzorek s okujemi, řezný plyn kyslík.



Obr. 24 Porovnání řezných hran [39]



Obr. 21 Princip laserového řezání [53]

Oxidační řezání je vhodné pro dělení konstrukčních uhlíkatých ocelí. Řezná hrana je pokryta okujemi. Roztavený kov částečně shoří v proudu řezného plynu. Exotermická reakce zvyšuje řeznou rychlost.

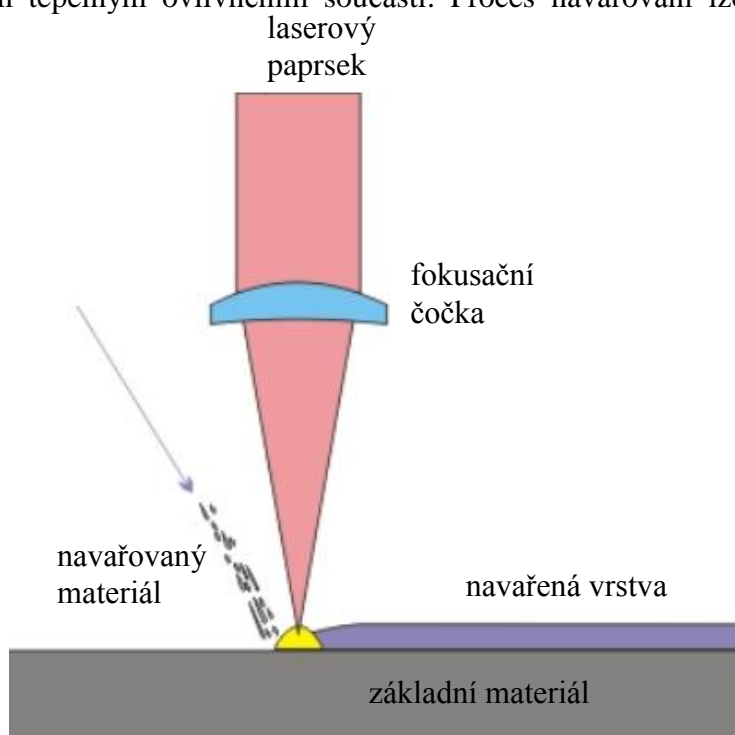
V praxi se pro řezání nejčastěji používají CO<sub>2</sub> lasery, nebo pevnolátkové lasery. Typickým zastupitelem pevnolátkových laserů je Nd: YAG laser.

Výhody:

- Vysoká řezná rychlost
- Kolmý řez
- Vysoká přesnost

### 2.2.2 Navařování [19], [24], [28]

Princip laserového navařování spočívá v navaření přídavného materiálu ve formě drátu nebo prášku, který je pomocí podavače dávkován spolu s plynem do osy laserového paprsku. Laserový paprsek nataví povrch materiálu a roztaví přídavný materiál, dochází k difuznímu spojení s minimálním tepelným ovlivněním součásti. Proces navařování lze snadno automatizovat. Robotizované zařízení dokáže na libovolné ploše navařovat jak velké, tak i miniaturní návary. Navařovat lze široké spektrum kovových, keramických a kompozitních materiálů. Navařením vrstvy z určitého materiálu lze dosáhnout lepších vlastností povrchu, jako je například lepší korozní odolnost, tvrdost, otěruvzdornost a tedy delší životnost. Navařovaný materiál má většinou lepší mechanické vlastnosti než základní materiál. Laserové navařování se používá pro opravy strojních součástí, kde došlo k poškození povrchu nebo například na opravy lisovacích a licích forem.



Obr. 25 Princip laserového navařování [28]

Místo výměny opotřeбенé nebo poškozené součásti lze opravit součástí technologií laserového navařování a ušetřit značné náklady. Je možné nahradit malou chybějící část velké součásti jako například zub ozubeného kola. Velmi častá aplikace je na opravy proudových strojů.

Výhody:

- Nejlepší technika pro navařování vrstev
- Vhodné i pro vnitřní dutiny a špatně dostupná místa
- Vhodné pro navařování malých a tvarově složitých struktur
- Nízká deformace podkladu a malá TOO



Obr. 26 Oprava licí formy [19]

- Vysoká rychlost ochlazování – jemná mikrostruktura
- Výsledná vrstva bez defektů a trhlin

Nevýhody:

- Strojně a instrumentačně náročné
- Nutné strojní vedení
- Vysoké investiční náklady

### 2.2.3 Kalení [17], [18], [24]

Princip laserového kalení spočívá v rychlém ohřevu materiálu, kde setrvává laserová hlava na povrchu materiálu s krátkou výdrží a poté dochází k ochlazení díky tepelné vodivosti materiálu. Mezi velkou výhodou patří možnost lokálního kalení materiálu, například kalení zubů ozubeného kola. Je zde možnost řídit požadovanou hloubku a tvrdost. U zakalených vrstev dochází k prodloužení životnosti. Změnou struktury lze dosáhnout lepší korozní odolnosti.

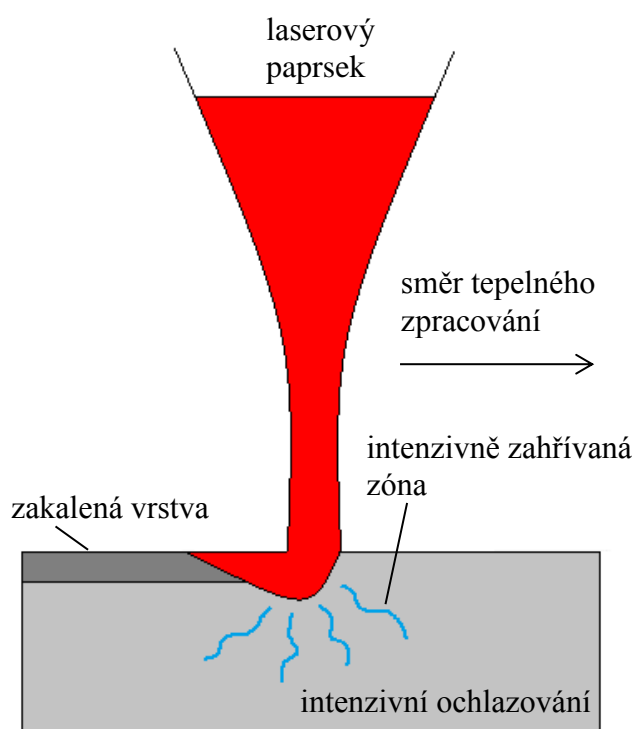
Pomocí laserového paprsku je možné rychle a kvalitně tepelně zušlechtit povrch materiálu až do hloubek v jednotkách milimetrů. Možné je rovněž kalení litin nebo nahrazení cementace a nitridace laserovým kalením a tím dosáhnout úspor nákladů. Laserové kalení využívá ke vzniku kalené vrstvy samoochlazovací efekt materiálu. Zahřívá se pouze horní část materiálu, která má být zakalena, ne celý objem. Zahřátá vrstva je dostatečně ochlazována okolním prostředím, tedy na vzduchu a okolním materiálem.

Výhody:

- Nižší energetická náročnost - kalení pouze požadovaných oblastí
- Nízké tepelně ovlivněná oblast materiálu - eliminace trhlin a deformací
- Řízení procesu dle aktuální teploty - možnost řízení hloubky prokalení a výsledné tvrdosti
- Nízká oxidace povrchu
- Žádná nebo minimální nutnost dalšího tepelného zpracování

Nevýhody:

- Strojně a instrumentačně náročné
- Nutné strojní vedení
- Vysoké investiční náklady



Obr. 27 Princip laserového kalení [17]



Obr. 28 Laserové kalení [18]



### 2.2.4 Označování povrchu [20], [23], [24], [56]

Během posledních dvou desetiletí se značení a gravírování stalo jednou z nejrozšířenějších laserových aplikací jak v průmyslu, tak i v oblasti reklamy, výroby dárkových předmětů a dokonce i umění. Lasery mohou gravírovat materiály do hloubky kolem 10  $\mu\text{m}$ . Takové značení je zvláště trvalé a dá se odstranit pouze silným broušením. Toto značení se často používá jako ochrana před paděláním. Laserové značení vyniká trvalostí naneseného nápisu či grafického motivu, flexibilitou, vysokou rychlostí popisu a nízkými provozními náklady. Nejedná se o kontaktní způsob značení. Je třeba zmínit i ekologickou stránku věci, v laserových popisovacích strojích se nepoužívají žádné barvy či jiné látky škodlivé pro zdraví a životnímu prostředí. Laserové stroje umožňují nanášet jak alfanumerické kódy, například sériová čísla a čárové kódy, tak i vektorové grafiky nebo rastrové obrázky.



Obr. 29 Laserový popis eloxovaného štítku [20]

Značení laserem spočívá v modifikaci povrchu materiálu vlivem laserového paprsku buď formou chemické reakce se změnou barvy povrchu nebo odstraněním tenké vrstvy materiálu jeho odpařením. Většina popisovacích zařízení používá plynové  $\text{CO}_2$  lasery nebo pevnolátkové Nd:YAG lasery.

Výhody:

- Nesmazatelnost
- Bezkontaktnost procesu
- Minimální tepelný vliv na povrch materiálu
- Rychlost značení až 8m/s
- Kvalita a ostrost popisu
- Ekonomická nenáročnost provozu



Obr. 30 Laserový popis plastu [20]

### 2.3 Interakce laseru s materiálem [1], [24]

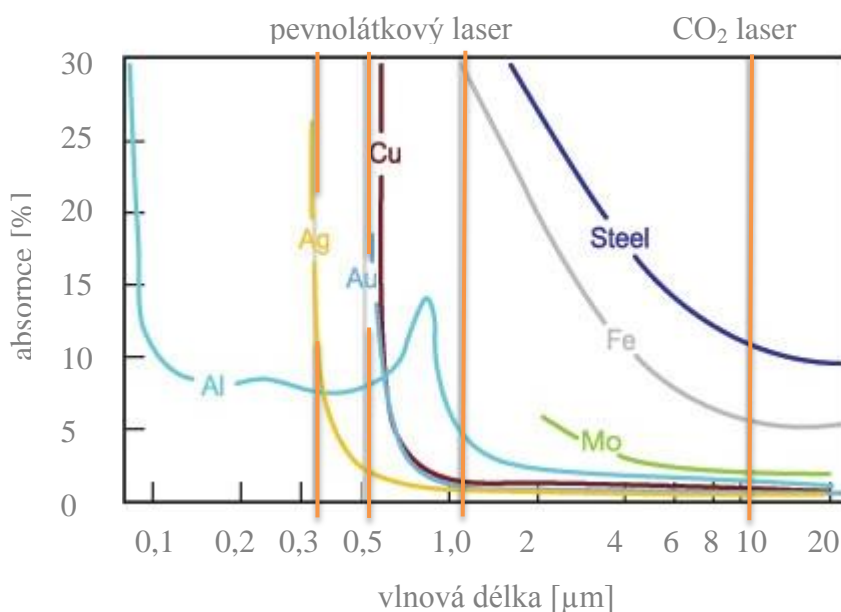
Hlavním předpokladem využití průmyslového laseru na zpracování materiálu je absorpce laserového paprsku a následná přeměna na teplo. Závislost vlnové délky na velikosti absorpce je znázorněna na obr. 31.

Energie dopadajícího laserového paprsku se dělí na odraženou, absorbovanou a prošlou. U kovů bývá prošlá energie nulová. Podle Wiedemann-Franzova zákona platí, že poměr elektrické a tepelné vodivosti je konstantní. Kovy s dobrou vodivostí mají nízký koeficient absorpce. Růstem teploty roste absorpce, protože elektrická vodivost kovů klesá. Hodnotu absorpce ovlivňují také materiálové vlastnosti a vlnové délky laserového paprsku. Všeobecně platí, že se zvyšováním vlnové délky koeficient absorpce klesá. Významným faktorem ovlivnění absorpce je také stav povrchu. V následující tabulce je uveden vliv stavu povrchu na koeficient absorpce pro ocel 35 NCD16.

Tab. 3 Vliv stavu povrchu na koeficient absorpce pro ocel 35 NCD16 [24]

Stav povrchu	Průměrná drsnost povrchu Ra	Absorpce [%] CO <sub>2</sub> laser	Absorpce [%] CO laser	Absorpce [%] YAG laser
Leštěný	0,02	5,15 - 5,25	8,55 – 8,70	29,75 – 30,00
Broušený	0,21 - 028	7,45 – 7,80	12,85 – 13,20	38,90 – 41,40
Válcovaný	0,87 – 3,35	5,95 – 12,65	13,10 – 21,50	33,80 – 51,70
Pískovaný	1,65	33,85 – 34,30	42,40 – 42,80	68,20 – 68,40
Broušený + koloidní grafit	-	74 - 76	77 - 78	88 - 92

Hodnotu koeficientu absorpce lze zvýšit například zdrsněním povrchu, nanesením černé barvy nebo předehřevem.



Obr. 31 Závislost vlnové délky na velikosti absorpce u různých materiálů [1]

Z Obr. 31 je patrné, že pro ocel je absorpce záření pevnolátkového laseru mnohem vyšší než u CO<sub>2</sub> laseru. Z toho důvodu lze použít například při řezání stejného materiálu u pevnolátkových laserů nižší výkon laserového paprsku než u CO<sub>2</sub> laseru.

### 3 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ [23], [24], [41], [42], [43], [51]

Laserové svařování patří mezi moderní technologie vytvářející nerozebíratelný spoj součástí. Laserem provedené svary se vyznačují vysokou jakostí, spolehlivostí a dobrým povrchovým vzhledem bez použití přídavného materiálu. Laserová technologie umožňuje svařovat materiály, které se konvenčními metodami svařují obtížně nebo se svařit vůbec nedají. Laserové technologie nachází uplatnění například v oblastech svařování plastů a technologicky složitých procesech svařování hliníku, mědi či mosaze. Charakteristika laserového svařování je popsána níže.

Výhody:

- Svařování bez přídavného materiálu
- Vysoká svařovací rychlost
- Svar s vysokou štíhlostí
- Průvarové svary
- Minimální tepelně ovlivněná oblast
- Minimální deformace svařence
- Vzájemná svařitelnost různých materiálů
- Vysoká přesnost a kvalita zpracování

Nevýhody:

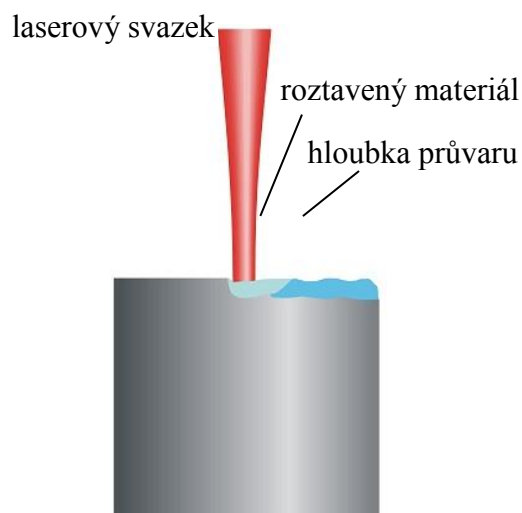
- Složité přípravkování
- Vysoké investiční náklady

#### 3.1 Princip laserového svařování [24], [42]

Na následujících obrázcích je schematicky znázorněn princip dvou režimů laserového svařování.

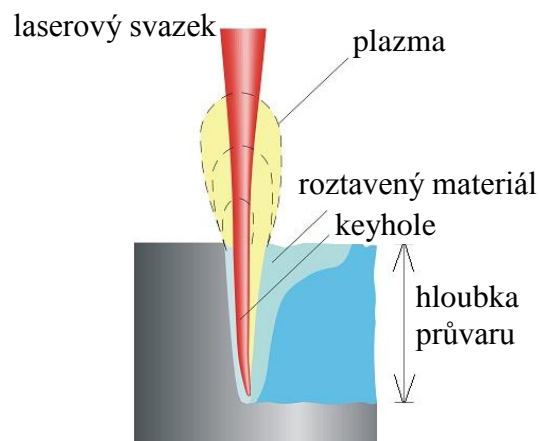
Kondukční svařování je svařování vedením tepla, materiál se taví absorpcí a vedením tepla dopadajícím laserovým svazkem. Tento postup umožňuje svařování jen do relativně malých hloubek průvaru. Nicméně rychlost svařování může být vyšší a pro některé aplikace je poměr hloubky průvaru a rychlost svařování vyhovující. Vyhovuje zvláště v případech, kde rychlost svařování je důležitější než úzký a hluboký průvar. Princip kondukčního režimu svařování je na obr. 32.

Penetrační svařování je docíleno zvýšením plošné hustoty výkonu, tím je dosaženo kritické hodnoty, kdy dochází k tvorbě par kovů nad samotným povrchem svařovaného materiálu. Společně spolu s působením vysoké plošné energie fokusovaného laserového paprsku se vytváří plasma a začíná docházet k hlubokému provařování. Laserový paprsek vytvoří kapiláru, která má průměr 1,5 až 2 násobek průměru ohniska laserového svazku. Tlak plynů vystupujících z kapiláry brání před jejím uzavřením. Tvar kapiláry je zpětně ovlivněn plasmou nad povrchem materiálu. Ze stěn kapiláry se vedením dostává vložená energie laserového paprsku do taveniny a dále do tuhého materiálu. Penetrační režim umožňuje laserovému paprsku proniknout hluboko do materiálu. Během procesu svařování



Obr. 32 Kondukční režim [42]

vzniká úzká a hluboká dutina, tzv. keyhole neboli „klíčová dírka“, která je naplněna kovovými parami a obklopena roztaveným materiálem. Pohybem svařovaného materiálu nebo fokusovaného laserového svazku vzniká svarový šev. Uvedením paprsku do pohybu začne tavenina dutinu uzavírat, svar je úzký s vysokým podílem hloubka/šířka. Tvar „klíčové dírky“ je během svařování udržován rovnováhou mezi vzájemným silovým působením taveniny a tlaku kovových par. Princip penetračního režimu svařování je na obr. 33.

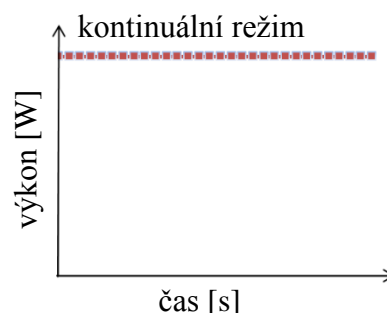


Obr. 33 Penetrační režim [42]

### 3.2 Svařovací režimy [7], [24], [37]

#### a) Kontinuální režim

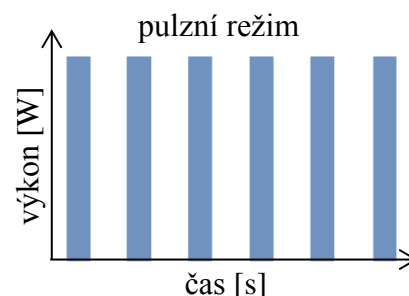
V kontinuálním režimu, neboli spojitě, se energie výstupního paprsku blíží její průměrné hodnotě. Ve zdroji nedochází k tak radikální akumulaci energie a následným výkonovým výkyvům systému, povaha záření má lineární charakteristiku. Závislost výkonu na času kontinuálního režimu je na obr. 34.



Obr. 34 Kontinuální režim [24]

#### b) Pulzní režim

V pulzním režimu je energie paprsku akumulována po delší dobu, proto má paprsek při svém výstupu vyšší výkon. Mezi jednotlivými výstupními paprsky vznikají prodlevy, které jsou dány časem nutným k nahromadění potřebné energie. Energie je vyzařována ve formě krátkých impulsů. Závislost výkonu na času pulzního režimu je na obr. 35.



Obr. 35 Pulzní režim [24]

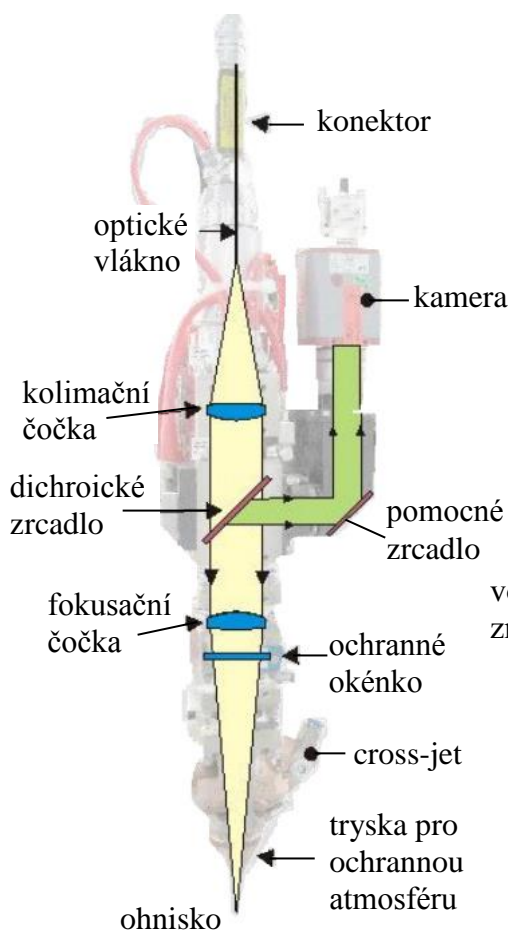
### 3.3 Parametry ovlivňující proces svařování [43]

- vlastnosti a parametry svařovaného materiálu
- výkon neboli plošná hustota výkonu či energie pulsu
- vlnová délka laseru
- rychlost svařování
- objem a typ svařovacího plynu
- polarizace laserového záření a mnoho dalších faktorů
- optické prvky ve svařovací hlavě
- poloha ohniska fokusovaného paprsku vůči trysce a povrchu svařovaného materiálu

Vnášení energie laserového paprsku se při svařování pomocí laseru příznivě ovlivňuje svařovacím plynem. Všeobecně používané svařovací plyny jsou argon, dusík, oxid uhličitý nebo helium. Ochranná atmosféra zvyšuje a stabilizuje stupeň absorpce plazmatu indukovaného laserem. Energie laserového paprsku může po vzniku plazmatu skoro zcela vniknout do materiálu a zvýšit tak efekt hlubokého provaření, tzv. keyhole. Svařovací plyn se využívá k ochraně chladnoucí taveniny před oxidací. Některé materiály je možné svařovat i bez ochranné atmosféry, pokud to dovoluje vytvoření plasmy a povrchová oxidace je přijatelná.

### 3.4 Svařovací hlava [43], [51]

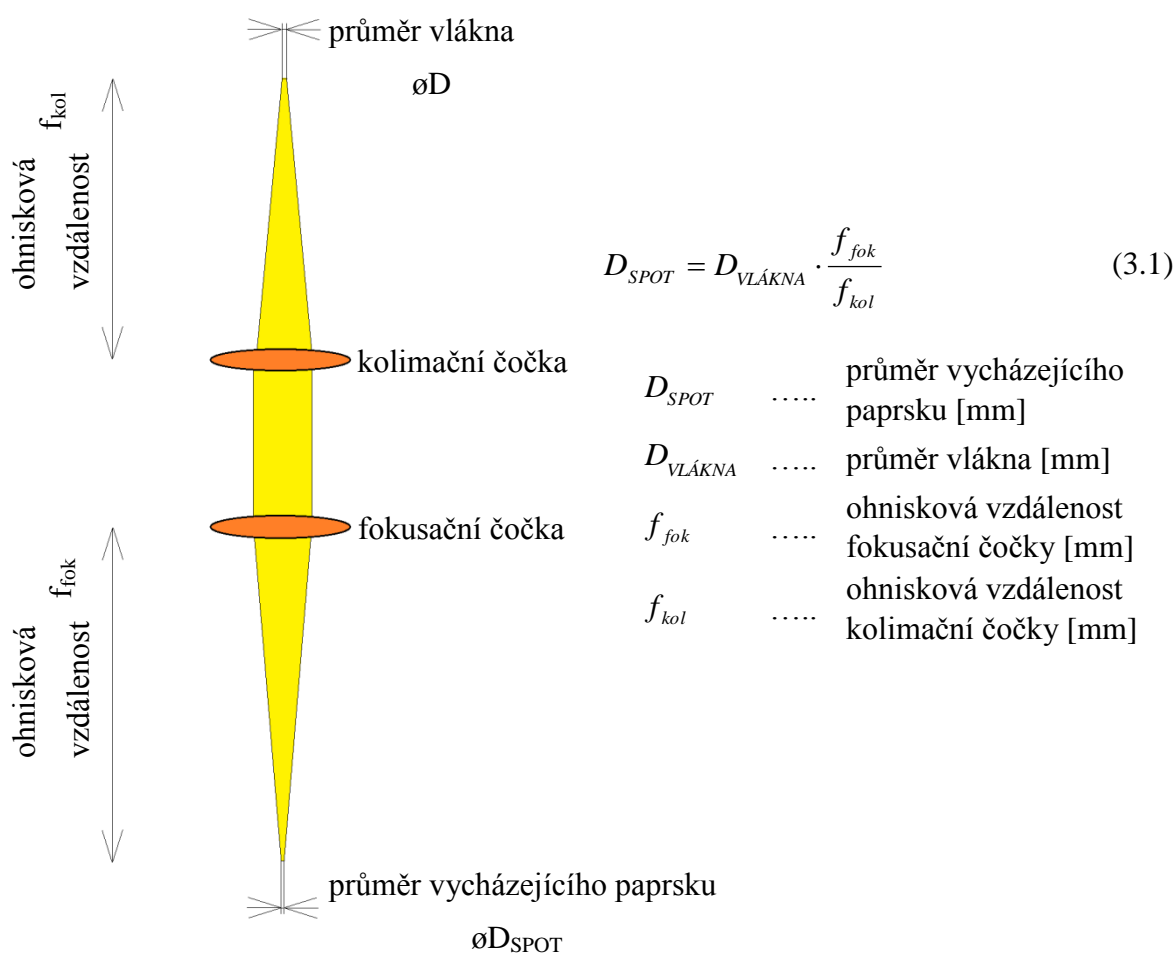
Svařovací hlava je obvykle nesena svařovacím robotem nebo je umístěna do kartézského polohovacího systému. Rameno robota může svařovací hlavu snadno umístit do definovaných pozic, tím lze efektivně provádět i svařování ve 3D. Svařovací hlava slouží k fokusaci laserového svazku. Tzv. cross-jet slouží jako ochrana optiky. Na následujících obrázcích jsou popsány jednotlivé části svařovací hlavy.



Obr. 36 Svařovací hlava [32]



Obr. 37 Svařovací hlava IPG D50 [33]



Obr. 38 Princip fokusace laserového paprsku [43]

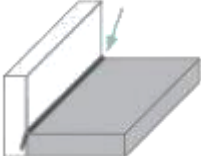

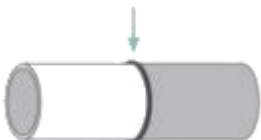
### 3.5 Typy laserových svarů [43], [24]

Při svařování laserem lze vytvářet všechny základní typy svarů, které se vytvářejí i ostatními technologiemi. Svařovací zařízení umožňuje svaření pomocí různých druhů svarů v určitých polohách, které jsou umožněny pohyblivostí svařovací hlavy. Obtížnost je v řízení trajektorie svarů v těžce dostupných místech, například dutiny.

Tab. 4 Typy laserových svarů [43]

Název	Zobrazení	Název	Zobrazení
Na tupo		Koutový vnější	
Lemový		Přeplátováním	



Název	Zobrazení	Název	Zobrazení
Koutový vnitřní		Axiální	
Radiální			

Zásadní roli hraje kombinace svařovaných materiálů. V tabulce níže je uvedena svařitelnost vybraných kovů a jejich slitin. Prázdná políčka v tabulce znamenají, že materiály nelze svařit.

Tab. 5 Vzájemná svařitelnost vybraných kovů [24]

	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	V													
Ag	U	U												
Au	U	V	V											
Cu	U	U	V	V										
Pd		V	V	V										
Ni	U		V	V	V	V								
Pt		U	V	V	V	V	V							
Fe			U	U	D	D	D	V						
Be			U	U	U	U		U						
Ti	U	U	U	U	U	U	U	U		V				
Cr			U		D	D	V	V		D				
Mo						U	V	D		V	V			
Te					D	D	U	U		V		V		
W					U	U	D	U		U	V	V	V	V

V - velmi dobrá, D - dobrá, U - uspokojivá

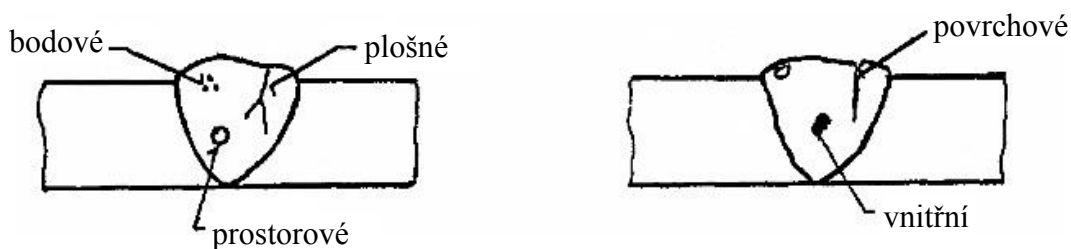
Svařování na tupo - materiály se přiloží vedle sebe a svaří se, svar je viditelný z obou stran. Je možné svařovat různé materiály s různou tloušťkou.

Průvarový svar je esteticky výhodný svar, kdy je laser schopen provařit dva i více materiálů položených na sebe. Tloušťky a typy materiálů mohou být odlišné. Svary mají výhodu v tom, že průvar nepronikne spodním materiálem, ale jen do určité hloubky. Svar tedy není viditelný na spodním materiálu a neohroží tak vzhled materiálu.

### 3.6 Svarové vady [41]

Vady ve svarech jsou nebezpečné koncentrátoři napětí, které nepříznivě ovlivňují velikost meze únavy a za určitých podmínek se mohou stát iniciátory křehkého lomu. Vada výrobku je každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami nebo smluvním vzorkem. Vady výrobku mohou být zjevné, které lze spatřit pouhým okem nebo skryté, které se zjišťují pomocí přístrojů nebo laboratorními zkouškami. Vady mohou být přípustné, nepřípustné, opravitelné nebo neopravitelné.

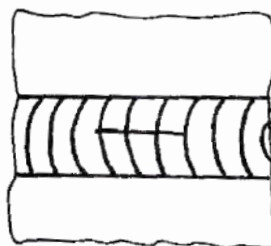
Podle polohy rozlišujeme svarové vady povrchové a vnitřní. Povrchové vady jsou trhliny, studené spoje na svarové ploše, neprovařený kořen, póry. Vnitřní vady jsou plynové dutiny, bubliny póry, vměstky, staženiny. Defekty ve svarových spoích se dělí podle tvaru a podle polohy výskytu. Podle tvaru jsou rozlišovány bodové vady, plošné vady a objemové vady.



Obr. 39 Vady ve svarech podle tvaru a polohy [41]

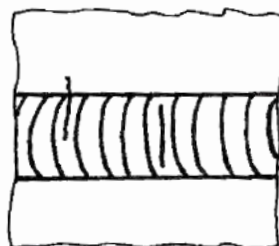
- Velmi častou svarovou vadou jsou trhliny ve svarovém kovu.

- trhliny podélné



Obr. 40 podélná trhlina vlevo uvnitř svaru, vpravo na povrchu svaru [41]

- trhliny příčné



Obr. 41 příčné trhliny, vlevo uvnitř svaru, vpravo na povrchu svaru [41]



Horké trhliny - vznikají při vysokých teplotách 800 až 900°C. Příčinou vzniku horkých trhlín je především chemické složení základního materiálu, vysoký obsah uhlíku, manganu a případně vyšší obsah síry. Detail horké trhliny je na obr. 36.

Žíhací trhliny - vznikají důsledku velkého teplotního gradientu mezi povrchem a středem svarového spoje v nízkoteplné oblasti do 300°C nebo v oblasti dolních žíhacích teplot 500 až 600°C, především u ocelí na bázi chromu a vanadu.

Studené trhliny - vznik studených trhlín je způsoben především působením vodíku, vliv má také vyšší obsah uhlíku a leguicích prvků. Vznikají obvykle po skončení svařování při teplotách pod 300°C. Studená trhlina je na obr. 36.

Lamelární trhliny - mohou vznikat v základním materiálu i v tepelně ovlivněné oblasti, především za vysokých teplot. Šířit se mohou i za studena. Vznikají za spolupůsobení napjatosti v místech, kde jsou u plechů rozválcovány nečistoty typu oxidických a siřičkových vměstků.

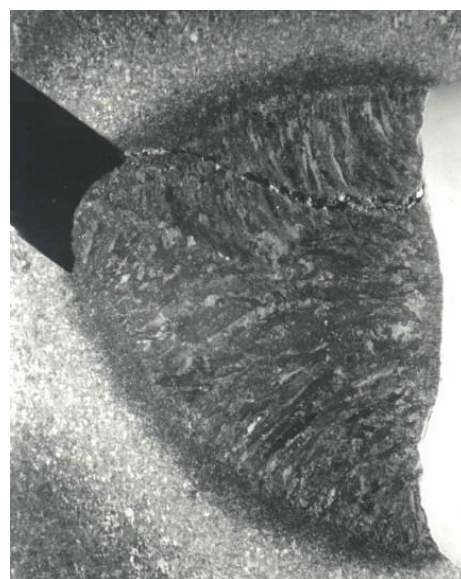
Kráterové trhliny - specifickým druhem trhlín jsou kráterové trhliny, které vznikají při náhlém a rychlém ukončení svařování. Vznikají smršťováním při tuhnutí svarového kovu v dutině kráteru.

Svarové vady se klasifikují od nejnebezpečnějších po méně nebezpečné. Svarové vady se dělí dle ČSN EN ISO 5817 do stupňů jakosti na:

- D – nízká kvalita svarů,
- C – střední kvalita svarů,
- B – vysoká kvalita svarů.

Plynové dutiny – jde o shluk či řádku dutin, bubliny, póry. Jedná se o objemové vady kulovitěho tvaru vyplněné plynem. Při svařování laserem je typický vznik bublin a řetězu bublin. Vlivem kmitání se „key hole“ uzavírá a bubliny zůstávají uvnitř. Vznik může být z důvodu nedostatečně vysušené elektrody, povrchových nečistot na svarových plochách, rychlého tuhnutí lázně či rychlého svařování.

Vměstky – struskové vměstky, nepravidelné různorodé útvary uzavřené ve svarovém kovu, ale také řádková struktura. Vznik vměstků je způsoben nedokonalým odstraňováním



Obr. 42 Horká trhlina [41]



Obr. 43 Studená trhlina [41]



Obr. 44 Kráterová trhlina [41]

strusky mezi svařovanými vrstvami. Nedokonalým očištěním svarových ploch vznikají oxidické vměstky, především u oxidů hliníku a hořčíku. Kovové vměstky vznikají následkem vysokých proudů nebo při porušení ochranné atmosféry.

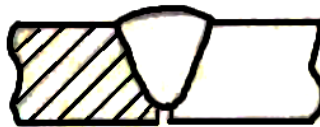


Obr. 45 Plynové dutiny [41]    Obr. 46 Plynové póry [41]    Obr. 47 Kovové vměstky [41]

Zápaly – jde o ostrá natavená prohloubení na hranicích základního materiálu a svarové housenky. Nejčastěji se zápaly vyskytují u koutových svarů.

Kořenové vady – propadnutý neboli prohloubený svar v kořeni, krápníky nebo neprovařený kořen svaru, který vzniká neúplným provařením svarových ploch.

Neprůvary – vznikají neúplným natavením základního materiálu nebo mezivrstev. Příčinou vzniku neprůvarů je vysoká rychlost svařování, předběhnutím svarové lázně.



Obr. 48 Zápaly [41]    Obr. 49 Neprovařený kořen [41]    Obr. 50 Neprůvary [41]

Studený spoj – vzniká na svarové ploše nedokonalým svarovým spojením svarového kovu se základním materiálem. Vznikají při vysoké rychlosti svařování nebo mezi vrstvami.

Vady povrchu svaru – jde o nadměrně prohloubený nebo nadměrně převýšený svar na povrchu.



Obr. 51 Studený spoj [41]

Obr. 52 Studený spoj [41]

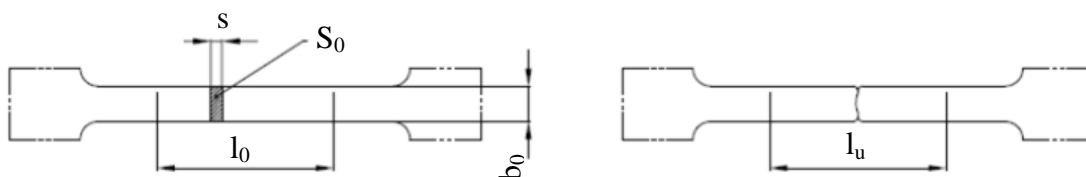
Obr. 53 Nedostatečné překrytí svarových ploch [41]

## 4 ZKOUŠKY MATERIÁLŮ A SVARŮ [11], [25], [46], [50], [55]

Bezpečný a spolehlivý provoz strojních součástí je v úzké souvislosti s užitnými vlastnostmi použitých materiálů a jejich svarových spojů. K ověření a deklaraci těchto vlastností se používají standardizované zkoušky. Je třeba zajistit přesnost a reprodukovatelnost výsledků za daných podmínek zkoušení.

### 4.1 Zkouška tahem [11], [25]

Základní zkouška používaná k ověření pevnostních a plastických charakteristik. Princip zkoušky spočívá v použití normalizované tyče kruhového průřezu, v případě zkoušení plechu ploché tyče, která je opatřena hlavou pro uchycení ve zkušebním trhacím stroji.



$S_0$ .....	výchozí průřez tyče [m <sup>2</sup> ]	$l_0$ .....	výchozí měřená délka tyče [m]
$s$ .....	tloušťka plechu [m]	$l_u$ .....	konečná měřená délka tyče [m]
$b_0$ .....	šířka zkoušené délky vzorku [m]		

Obr. 54 Plochá zkušební tyč [25]

Ve zkušebním stroji dochází k natahování zkušební tyče mezi dvěma příčníky od nulového zatížení až do okamžiku přerušení tyče. Zkouška je prováděna za definovaných podmínek (teplota, tlak, deformace). Závislost zatížení na prodloužení představuje tzv. klasický tahový diagram. Z tahového diagramu lze definovat následující charakteristické údaje:

- a) platnost Hookova zákona, tj. lineární závislost deformace na napětí podle vzorce:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]} \quad (4.1)$$

$\sigma$  .....

napětí [Mpa]

$\varepsilon$  .....

deformace [%]

$E$  .....

modul pružnosti v tahu [Mpa]

- b) mez kluzu

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4.2)$$

$F_e$  .....

zatížení na mezi kluzu [N]

Některé kovové materiály vykazují výrazné odlišení horní a dolní meze kluzu, u vysoce pevných materiálů lze naopak pozorovat nevýraznou mez kluzu. Z praktického hlediska byl stanoven vztah pro smluvní tzv. mez kluz –  $R_{p0,2}$ . Takto zjištěná mez kluzu je rovnocenný ekvivalent reálné meze kluzu. Je určena průsečíkem rovnoběžky s lineárním průběhem zatížení – deformace ve vzdálenosti 0,2 % deformace.

- c) mez pevnosti materiálu neboli maximální dosažené zatížení

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4.3)$$

$F_m$  ..... maximální zatížení [N]

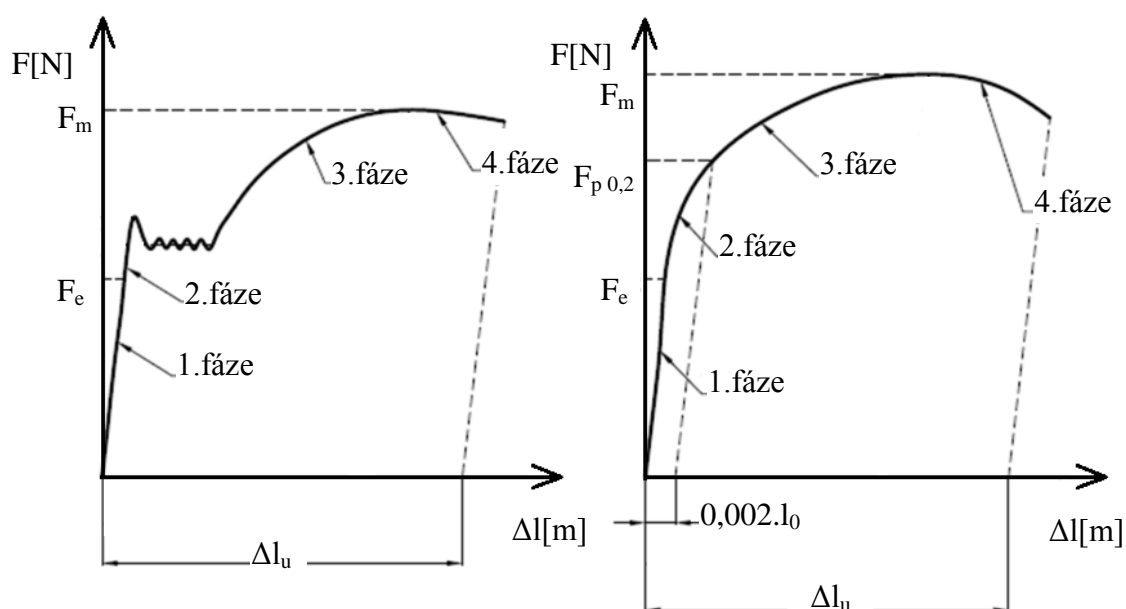
d) tažnost – základní plastická vlastnost materiálu

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.4)$$

e) kontrakce, neboli zúžení, je další plastická vlastnost materiálu

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.5)$$

$S_u$  ..... konečný průřez tyče [m]



1. fáze – oblast pružných deformací

2. fáze – oblast od meze úměrnost do meze kluzu

3. fáze – oblast rovnoměrných trvalých deformací

4. fáze - oblast nerovnoměrných trvalých deformací

Obr. 55 Tahový diagram s výraznou mezí kluzu vlevo, s nevýraznou mezí kluzu vpravo [11]

Hodnoty meze kluzu  $R_e$  ( $R_{p\ 0,2}$ ), meze pevnosti ( $R_m$ ), tažnosti ( $A$ ) a kontrakce ( $Z$ ) představují základní pevnostní a plastické vlastnosti kovových materiálů dle ČSN EN ISO 6892-1. Tyto hodnoty jsou předmětem základního zkoušení prakticky u všech strojírenských výrob a dodávek.

## 4.2 Metalografické šetření [25]

Je běžně používaným doplňkem testů mechanických vlastností při ověřování struktury materiálu, respektive svarových spojů. Metalografické zkoušky se dělí podle použitého zvětšení na ověření makrostruktury a mikrostruktury. Vzorky pro metalografickou analýzu je třeba dokonale připravit. Příprava se skládá z vhodného mechanického dělení materiálu, postupného broušení studovaného povrchu na metalografických papírech se zvyšujícím počtem brusných elementů, tedy se zvětšující jemností papíru. Leštění, buď elektronicky nebo mechanicky, s použitím diamantových past a vhodného leptání chemickými nebo elektrolytickými postupy. Výsledky metalografických pozorování jsou obvykle dokladovány fotografickou reprodukcí.

### 4.2.1 Makrostrukturní rozbory [25]

Provádějí se vizuálním porovnáním pouhým okem nebo při relativně malém optickém zvětšení např. lupou, optickým mikroskopem do zvětšení 30x. Pokud se jedná o svarové spoje, často se používá jak pro vyhodnocení tvaru svaru, způsobu kladení svarových vrstev, odmísení svarového kovu, tvaru, šířky a charakteru tepelně ovlivněné zóny, hranice ztavení.

#### a) Baumannův otisk

Baumannův otisk je kvalitativní zkouška. Slouží ke stanovení charakteru vyloučení segregací síry, neboli sulfidických vměstků v oceli za předpokladu, že se jedná o sulfidy manganu nebo železa. Postup zkoušky je v chemické reakci mezi sulfidickými vměstkami v rovině výbrusu a mezi citlivou vrstvou fotografického bromostříbrného papíru. Každý Baumannův otisk je proto originálem, k jeho opakování je nezbytné opakování procedury broušení a leštění povrchu.

#### b) Makrolept

Makrolept slouží k určení charakteru makrostruktury výbrusu daného povrchu. V případě oceli umožňuje studovat např. její primární krystalizaci, příčiny porušení celistvosti materiálu, rozdělení různých prvků jako jsou nečistoty, stanovit hloubku nauhličených nebo oduhličených vrstev, posoudit jakost svarových spojů apod. Makrostruktura je vyvolána naleptáním vybroušeného povrchu vhodným činidlem. Nejčastěji používaná leptadla jsou vodní roztoky kyseliny dusičné nebo persíranu amonného.

### 4.2.2 Mikrostrukturní rozbor [25]

#### a) Kvalitativní mikrostrukturní rozbory

Mikrostruktura materiálu je při kvalitativních mikrostrukturních rozborech zkoumána na vhodně připravených metalografických výbrusech zkušebních vzorků za použití optických mikroskopů při zvětšení cca 30x až 2 000x. Analýza zahrnuje odpovídající přípravu metalografických vzorků, vyvolání mikrostruktury materiálu vhodným leptáním, pozorování mikrostruktury v optickém mikroskopu, její vyhodnocení a provedení fotodokumentace.

Základním výsledkem mikroskopického studia je posouzení vzhledu mikrostruktury, určení přítomnosti a množství základních strukturních fází (ferit, austenit, cementit, martenzit) nebo strukturních složek (perlit, bainit).

#### b) Stanovení plošného podílu strukturních složek

K plošnému podílu strukturních složek slouží bodová metoda. Hodnocení je prováděno na světelném mikroskopu při dostatečném zvětšení, aby došlo k rozlišení jednotlivých strukturních složek. Hodnocení se provádí na matnici mikroskopu, na níž je položena transparentní fólie s vyrytou mřížkou, nebo s využitím statistických integrátorů.

c) Stanovení obsahu nekovových vměstků v ocelích

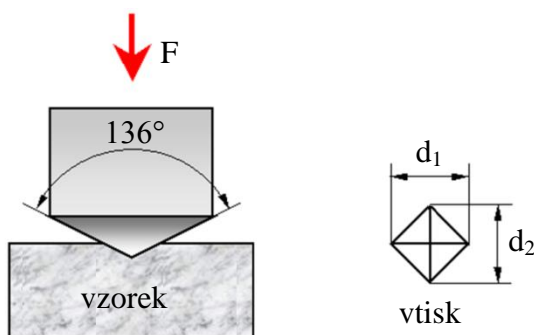
Je významným údajem k posouzení typu, rozložení a velikosti jednotlivých vměstků obsažených v oceli. Tzv. vměstkovitost je porovnání zorného pole mikroskopu s etalony příslušných norem.

d) Stanovení velikosti zrna

Provádí se k posouzení zrnitosti struktury, rozsahu zhrubnutí původního austenitického zrna vlivem technologií výroby. V případě svarových spojů se posuzuje míra zhrubnutí pásem tepelně ovlivněné oblasti i svarového kovu. Vlivem technologie výroby se rozumí např. ohřev na tvářecí teplotu, tepelné zpracování atd. Vlastní stanovení se provádí srovnáním s etalony příslušných norem po předchozím leptání speciálními leptadly. U kalených a zušlechťených struktur se ke zvýraznění hranic zrn používá např. oxidačních postupů za zvolených teplot.

#### 4.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [25], [46], [50], [55]

Zkouška je prováděna dle ČSN 42 0374. Průběh zkoušky: do materiálu se vtlačuje pod zatížením silou  $F$  diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o daném vrcholovém úhlu mezi protilehlými stěnami po danou dobu. Síla působí kolmo na povrch vzorku. Následně se změří střední délka u obou úhlopříček vtisku. Zkušební zatěžující síla se pohybuje od 10 do 1000 N. Doba zatížení je volena od 10 do 180 s. Použité zatížení se píše do označení, např. HV 100 (HV 100 = 215). Pro běžně zkušební zatížení 300 N a dobu od 10 do 15 s se používá označení HV.



Obr. 56 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [50]

Tvrdost podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně. Tvrdost podle Vickerse je určena poměrem vtláčovací síly  $F$  a povrchu vtisku.

$$HV = 0,189 \cdot \left( \frac{F}{d^2} \right) [-] \quad (4.6)$$

$F$  ..... síla vtláčování [N]

$d$  ..... úhlopříčka vtisku [ $\mu\text{m}$ ]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4.7)$$

$d_1$  ..... průměr vtisku v úhlopříčce [ $\mu\text{m}$ ]

$d_2$  ..... průměr vtisku v úhlopříčce [ $\mu\text{m}$ ]

Pro praktickou potřebu se používají tabulky, kde podle délky úhlopříčky  $d$  a použité síly  $F$  je uvedena odpovídající tvrdost.

Metodu měření tvrdosti podle Vickerse lze použít pro všechny tvrdosti. Metoda je velmi přesná a je minimálně závislá na zatížení.

Ve velkých závodech se pro kontrolování tvrdosti po celou pracovní dobu používá zdokonalených Vickersových tvrdoměrů, tzv. diatestorů. Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici, což umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky úhlopříčky  $d$ .

Výhodou Vickersovy metody je možnost měření velmi tenkých a velmi tvrdých vrstev při nepatrné stopě vtisku.

## 5 EXPERIMENT [3], [6], [8], [9], [10], [25], [26], [30], [35]

V této části jsou popsána jednotlivá pracoviště a zařízení nutné pro provedení experimentu. Praktická část zahrnuje volbu svařovaného materiálu, volbu dostatečného počtu vzorků, přípravné práce, svařování vzorků a provedení zkoušek pro vyhodnocení experimentu. Vzorky byly podrobeny tahové zkoušce, metalografickému šetření a zkoušce tvrdosti dle Vickerse.

### 5.1 Volba materiálu [6], [9], [25]

Pro experiment byl vybrán materiál DC01, mezní úchytky rozměrů a tolerance tvaru dle ČSN EN 10131 a korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (1.4301), mezní úchytky rozměrů a tolerance tvaru dle EN ISO 9445.

Materiál DC01, plech válcovaný za studena k tváření za studena se zaručenou svařitelností v závislosti na rozměrech polotovaru, je využíván především v automobilovém průmyslu pro výrobu karoserií. Ekvivalentní označení materiálu je dle ČSN 11 321.

Materiál X5CrNi18-10 (1.4301), plech válcovaný za studena, představuje víc jak polovinu celkové výroby korozivzdorných ocelí. Využívá se zejména pro potravinářský průmysl, ale také pro vysoce kvalitní použití, jako třeba pro jaderné reaktory a kryogenní zařízení. Vedle dobrých vlastností s ohledem na korozi poskytují tento typ oceli vynikající schopnost tváření a také velmi dobrou svařitelnost. Ekvivalentní označení materiálu je dle ČSN 17 240.

U obou materiálů je pro experiment použit plech o tloušťce 1, 2 a 3 mm.

- Svařitelnost uhlíkových ocelí – při svařování uhlíkových nelegovaných ocelí je třeba počítat s tím, že uhlík v TOO způsobuje zvýšení tvrdosti, současně snižuje plasticitu, vniklé vnitřní pnutí může vést ke vzniku trhlin, jeden z aspektů posouzení komplexní charakteristiky ocelí pro danou součást je určení tzv. ekvivalentního obsahu uhlíku
- Výpočet uhlíkového ekvivalentu

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024s \quad [\%] \quad (5.1)$$

s ..... tloušťka plechu [mm]

Tato rovnice platí pro materiály do obsahu prvků: C = 0,22 hm. %, Mn = 1,60 hm. %, Cr = 1,00 hm. %, Ni = 3,00 hm. %, Cu = 0,30 hm. %, přičemž ekvivalentní obsah uhlíku  $C_e \leq 0,50$ .

$$C_e = 0,12 + \frac{0,6}{6} + \frac{0}{5} + \frac{0}{15} + \frac{0}{4} + \frac{0}{13} + \frac{0}{2} + 0,0024 \cdot 1 = 0,2449 \leq 0,50$$

$$C_e = 0,12 + \frac{0,6}{6} + \frac{0}{5} + \frac{0}{15} + \frac{0}{4} + \frac{0}{13} + \frac{0}{2} + 0,0024 \cdot 2 = 0,2473 \leq 0,50$$

$$C_e = 0,12 + \frac{0,6}{6} + \frac{0}{5} + \frac{0}{15} + \frac{0}{4} + \frac{0}{13} + \frac{0}{2} + 0,0024 \cdot 3 = 0,2497 \leq 0,50$$

Všechny tři tloušťky materiálu je podle výpočtu uhlíkového ekvivalentu možné svařovat bez zvláštních okolností – bez přehřevu.



- Svařitelnost austenitických ocelí – vzhledem k austenitické struktuře mají oceli lepší tažnost a houževnatost než uhlíkové a nízkouhlíkové oceli, vyznačují se nízkou tepelnou vodivostí při svařování, to se projevuje vznikem větších deformací a napětí, které mohou zapříčinit vznik trhlin.

## 5.2 Mechanické vlastnosti a chemické složení materiálů [3], [30]

Materiály jsou při používání vystaveny různému namáhání: tah, tlak, krut, střih, ohyb. Tato namáhání zpravidla nepůsobí samostatně, ale v různých kombinacích. Aby materiál odolal tomuto namáhání, musí mít určité vlastnosti, jako je pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost atd. Na mechanické vlastnosti má vliv teplota. Mechanické vlastnosti a chemické složení svařovaných materiálů jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 6 Mechanické vlastnosti materiálu DC01 [3]

Stav	Značka	Pevnost na mezi kluzu	Pevnost v tahu	Tažnost	Tvrdost
		$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	HV
žíhaná	A	-	270 - 390	28	max. 105
lehce převálcovaná	LC	max. 280	270 - 420	28	max. 115
zpevněná za studena	C290	200 - 380	290 - 430	18	95 - 125
	C340	min. 250	340 - 490	-	105 - 155
	C390	min. 310	390 - 540	-	117 - 172
	C440	min. 360	440 - 590	-	135 - 185
	C490	min. 420	490 - 640	-	155 - 200
	C590	min. 520	590 - 740	-	185 - 225
	C690	min. 630	min. 690	-	min. 215

Tab. 7 Chemické složení materiálu DC01 [3]

Chemické složení - max. hmotnostní podíl [%]			
C	P	S	Mn
0,120	0,045	0,045	0,600

Tab. 8 Mechanické vlastnosti materiálu X5CrNi18-10 (1.4301) [30]

Pevnost na mezi kluzu	Pevnost v tahu	Tažnost	Tvrdost
$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	HB
min. 210	520 - 720	min. 45	max. 220

Tab. 9 Chemické složení materiálu X5CrNi18-10 (1.4301) [30]

Chemické složení - hmotnostní podíl [%]				
C max.	Si max.	Mn max.	Cr	Ni
0,07	1,0	2,0	17,0 - 19,0	8,5 - 10,5

### 5.3 Příprava a svařování vzorků [14], [35]

Jak již bylo řečeno v předešlých kapitolách, při svařování plechů na tupo je možný vznik mezery mezi svařovanými plechy, která může mít vliv na vlastnosti provedeného svaru. Pro experiment byly vybrány dva různé materiály, oba o tloušťkách 1, 2 a 3 mm. Jsou zvoleny malé tloušťky materiálů z důvodu využití v automobilovém průmyslu. Vzorky budou postupně svařovány se zvyšující se mezerou. Maximální mezera svařování je ovlivněna průměrem vycházejícího paprsku laseru. Výpočet průměru vycházejícího paprsku je uveden níže.

$$D_{SPOT} = D_{VLÁKNA} \cdot \frac{f_{fok}}{f_{kol}}$$

$$D_{SPOT} = 0,2 \cdot \frac{200}{100}$$

$$D_{SPOT} = 0,4 \text{ mm}$$

$D_{SPOT}$  ..... průměr vycházejícího paprsku

$D_{VLÁKNA}$  ..... průměr vlákna

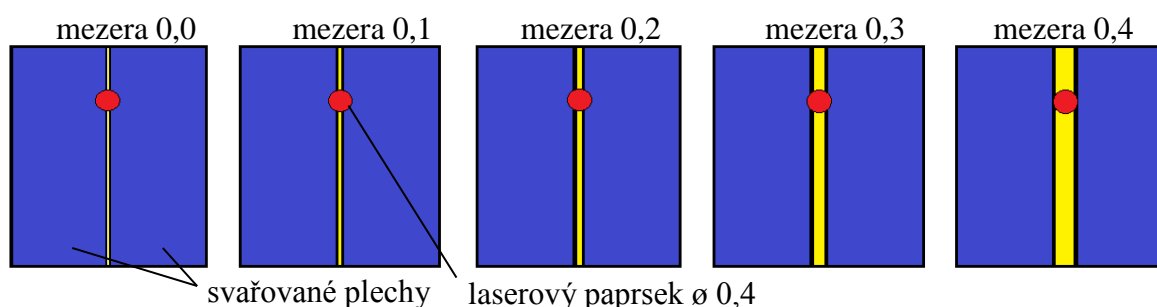
$f_{fok}$  ..... ohnisková vzdálenost

$f_{fok}$  ..... fokusační čočky

$f_{kol}$  ..... ohnisková vzdálenost

$f_{kol}$  ..... kolimační čočky

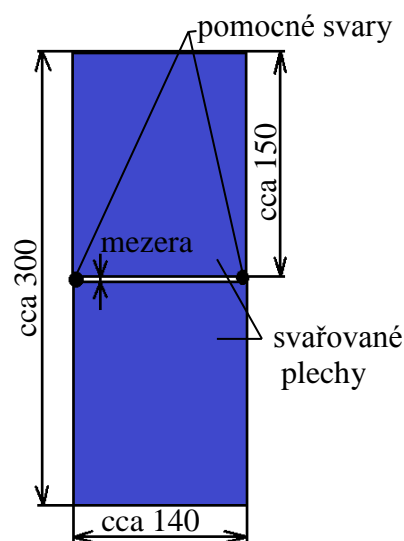
Průměr vycházejícího paprsku laseru je 0,4 mm. Z toho plyne, že mezera mezi svařovanými plechy musí být menší než tato hodnota, jinak by paprsek prošel mezerou a plechy se nesvařily.



Obr. 57 Vliv průměru vycházejícího paprsku na mezera mezi svařovanými plechy

Z obr. 46 je patrné, že mezera 0,4 mm odpovídá průměru vycházejícího paprsku. Mezera 0,4 mm mezi plechy je příliš velká. Pro experiment bude použita mezera 0,0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm a 0,3 mm.

Vzorky z materiálu DC01 jsou vyřezány na laseru z tabulí plechů. Vzorky z materiálu X5CrNi18-10 jsou vyřezány na vodním paprsku. Rozdílný způsob přípravy vzorků je z důvodu rozdělení práce, na vzorky nemá žádný vliv. Mezera mezi svařovanými plechy je vymezena pomocí párových měrek. Aby nedošlo ke zmenšení nebo zvětšení mezery při svařování, jsou vzorky opatřeny pomocnými svary, které zajistí přesnost průběhu svařování laserem. Svařování vzorků s mezerou 0,0 mm až 0,3 mm bude probíhat za stejných svařovacích parametrů.



Obr. 58 Připravený vzorek pro svařování

Počet svařovaných vzorků je dán počtem svařovaných materiálů, tloušťek a mezer mezi plechy. Přehled svařovaných vzorků je v tabulce níže.

Tab. 10 Počet svařovaných vzorků.

Materiál: DC01, X5CrNi18-10				
Tloušťka [mm]	Mezera [mm]			
1	0,0	0,1	0,2	0,3
2	0,0	0,1	0,2	0,3
3	0,0	0,1	0,2	0,3

Celkový počet svařovaných vzorků je 24. Předpokládá se, že se zvětšující se mezerou mezi plechy bude kvalita svaru klesat. U korozivzdorné oceli X5CrNi18-10, která má malou tepelnou vodivost, se předpokládá malý odvod tepla z oblasti svařované zóny, a tedy lepší podmínky pro svařování s mezerou mezi plechy.

Experiment byl proveden na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Vzorky byly svařeny pomocí vláknového Yb-YAG laseru, model YLS 2000. Technické parametry vláknového laseru jsou uvedeny v tabulce 11. Laserový paprsek je přenášen pomocí optického vlákna dopovaného ytterbiem.

Tab. 11 Technické parametry laseru YLS 2000 [14]

Výkon	2 000 W
Vlnová délka	1070 – 1080 nm
Účinnost	>30 %
Režim	kontinuální/pulzní
Rozměry (d x v x š)	1106 x 856 x 806 mm

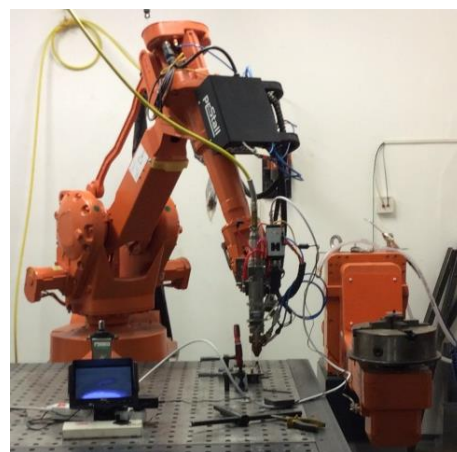


Obr. 59 Yb–YAG laser [14]

Laser má řezací i svařovací hlavu, která je nesena průmyslovým robotem firmy ABB, model IRB 2400/10. Technické parametry průmyslového robota jsou uvedeny v tabulce 12. Tento průmyslový robot je velmi často používán pro strojírenské aplikace pro svou spolehlivost, rychlost a přesnost.

Tab. 12 Technické parametry robota IRB 2400 [35]

Dosah	1,55 m
Nosnost	10 kg
Počet stupňů volnosti	6 + 2 přídavné zařízení
Hmotnost	380 kg
Rozměry (d x v x š)	600 x 1564 x 723
Přesnost polohy	0,03 mm
Přesnost dráhy	0,11 – 0,15 mm
Napájecí napětí	200 – 600 V, 50/60 Hz

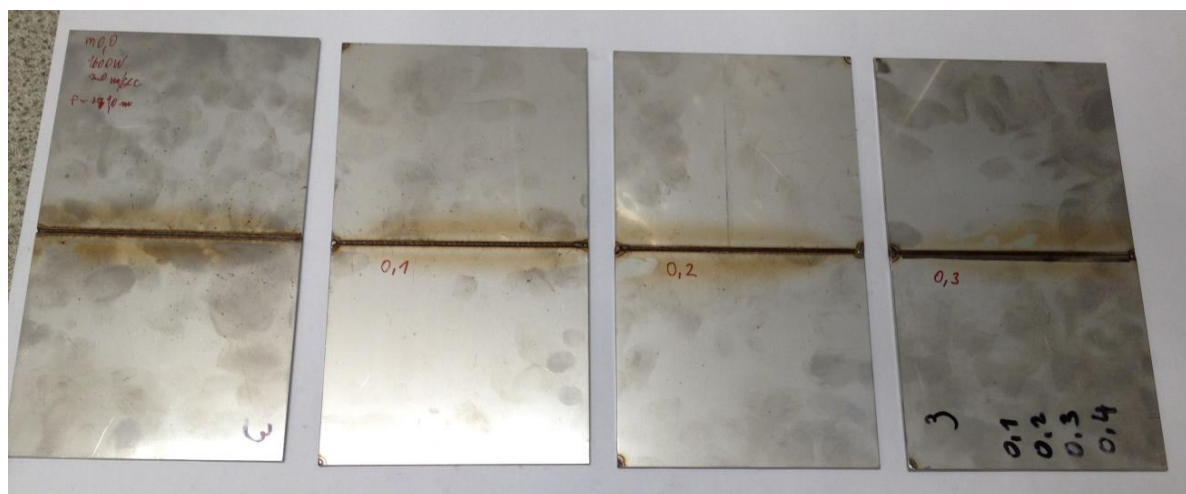


Obr. 60 Robot IRB 2400/10

Před samotným svařováním bylo třeba připravený vzorek upnout pomocí upínek ke svařovacímu stolu. Po upnutí následovalo projetí trajektorie svaru nanečisto. Tím se vyloučilo možné vychýlení z trajektorie, které mohlo vzniknout posunem vzorku při upínání. Svařovací parametry jsou vždy konstantní pro daný materiál a tloušťku, jsou uvedeny v tab. 13. Takto zvolené parametry svařování, jsou výsledkem zkušeností se svařováním daného materiálu na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Posledním krokem je samotné svařování.

Tab. 13 Svařovací parametry

DC01				X5CrNi18-10			
Thloušťka [mm]	Výkon [W]	Rychlost svařování [mm/s]	Ochranný plyn [l/min]	Thloušťka [mm]	Výkon [W]	Rychlost svařování [mm/s]	Ochranný plyn
1	800	30	Argon 18	1	800	30	Argon 18
2	1300	30	Argon 18	2	1200	30	Argon 18
3	1600	20	Argon 18	3	1600	20	Argon 18



Obr. 61 Svařené vzorky - materiál X5CrNi18-10

V následující tabulce je přehled svařovaných vzorků. Většina vzorků s mezerou 0,3 mm se nesvařila. U těchto vzorků paprsek prošel mezerou skrz materiál a nedošlo ke svaření v celé délce, tyto vzorky byly vyřazeny.

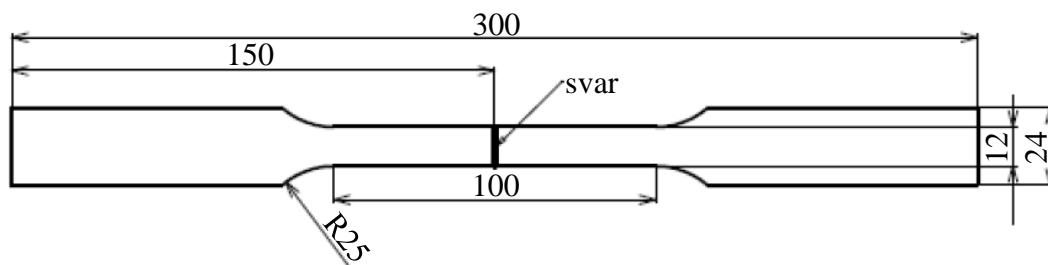
Tab. 14 Přehled svařovaných vzorků

DC01					X5CrNi18-10				
Tloušťka [mm]	Mezera [mm]				Tloušťka [mm]	Mezera [mm]			
	0,0	0,1	0,2	0,3		0,0	0,1	0,2	0,3
1	S	S	S	N	1	S	S	S	N
2	S	S	S	N	2	S	S	S	N
3	S	S	S	N	3	S	S	S	S

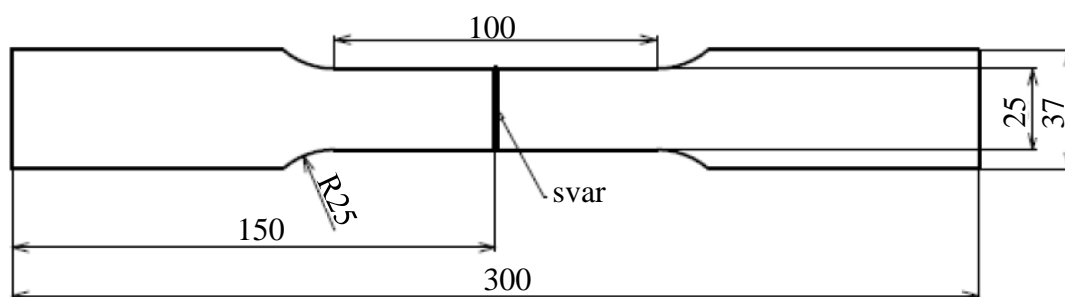
S – svařeno, N - nesvařeno

#### 5.4 Zkouška tahem [25]

Z každého svařeného vzorku byly laserem vyřezány tři zkušební tělesa na tahovou zkoušku. Rozměry zkušebních těles se mění v závislosti na tloušťce materiálu. Geometrie zkušebních těles byly navrženy dle ČSN EN 895. Pro experiment jsou použity dvě velikosti zkušebních těles, které jsou zobrazeny na obrázcích níže.



Obr. 62 Rozměry zkušebního tělesa pro tloušťku plechu  $\leq 2$  mm.



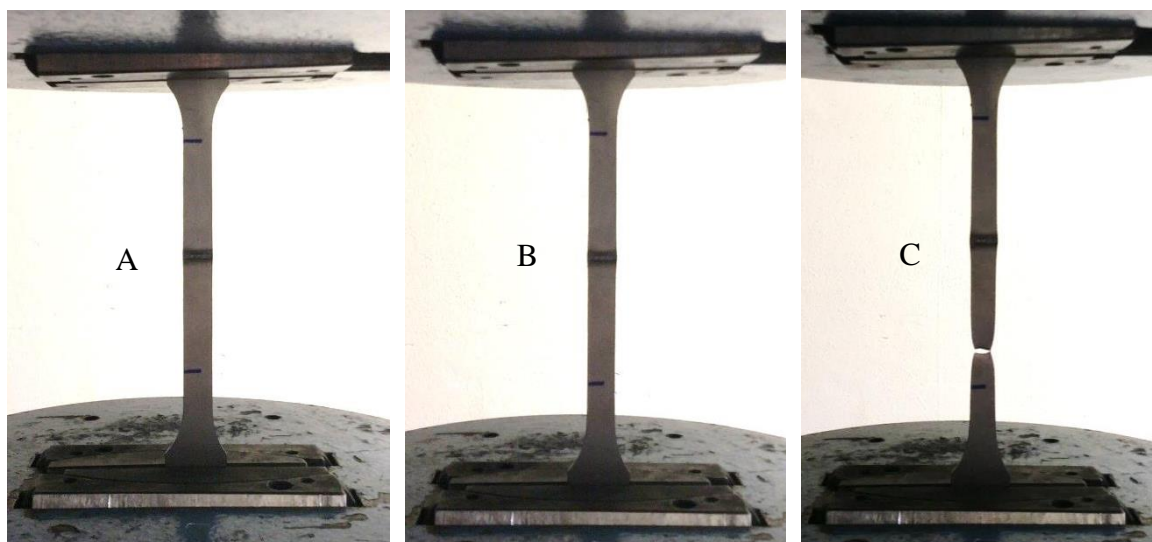
Obr. 63 Rozměry zkušebního tělesa pro tloušťku plechu  $\geq 2$  mm.

Zkoušky jsou prováděny na hydraulickém zkoušecím stroji ZD40/400kN. Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Více informací a technické údaje stroje jsou v příloze č.1. Připravené vzorky na tahovou zkoušku jsou na obr. 64.



Obr. 64 Zkušební tělesa

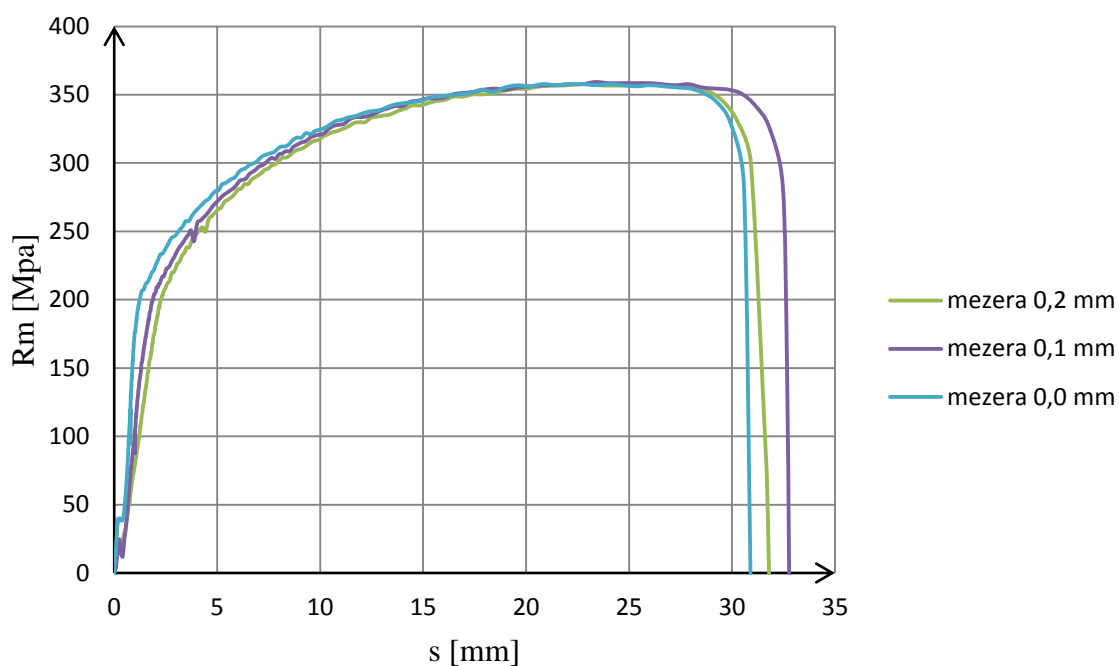
Vzorky jsou upínány do stroje pomocí kleštin. Zkušební těleso je namáháno tahem. Zvětšující se síla namáhá těleso až do jeho přetržení. Průběh zatížení je zaznamenán pomocí programu do počítače. Upnuté zkušební těleso a průběh zkoušky je na obrázku níže.



Obr. 65 Průběh tahové zkoušky, A – upnutí, B – zatížení tahem, C - přetržení

- Materiál DC01 – tloušťka plechu 1 mm
- U všech vzorků došlo k lomu mimo svar – dobrá kvalita svarů
- Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu

Graf č.1 Tahový diagram materiálu DC01 tloušťka 1 mm



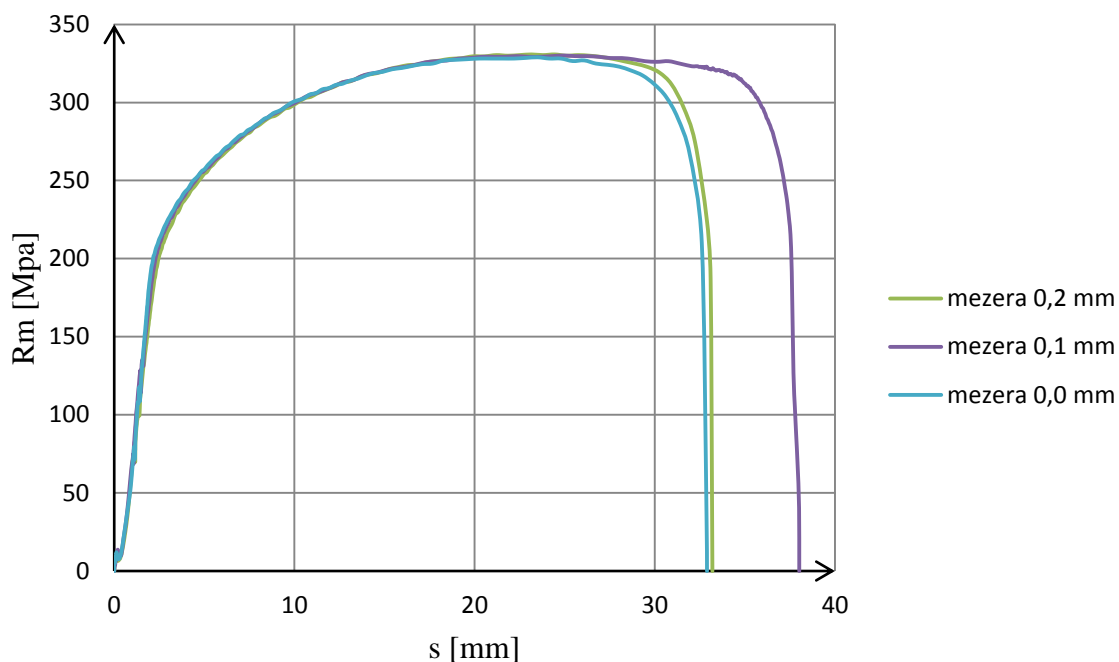


Tab. 15 Naměřené hodnoty – DC01 tloušťka plechu 1 mm

Mezera [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Lom
0,0	11,54	4138,0	207,8	358,6	28,8	Mimo svar
0,1	11,70	4213,2	208,2	360,1	30,0	Mimo svar
0,2	11,60	4166,4	215,7	359,2	28,8	Mimo svar

- Materiál DC01 – tloušťka plechu 2 mm
- U všech vzorků došlo k lomu mimo svar – dobrá kvalita svarů
- Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu

Graf č.2 Tahový diagram materiálu DC01 tloušťka 2 mm



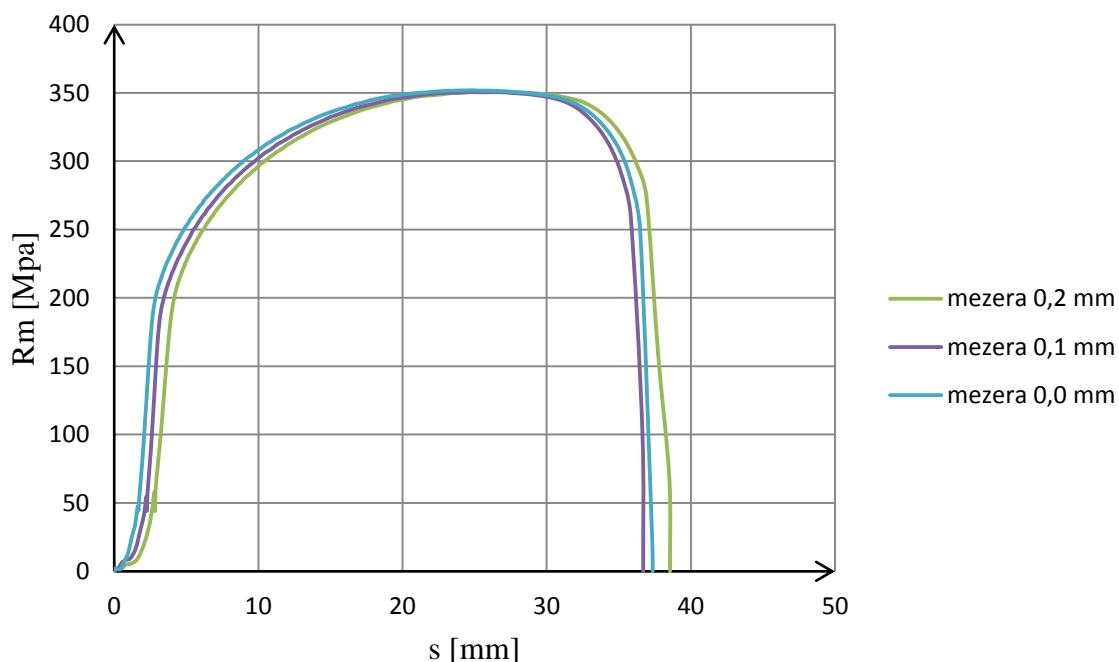
Tab. 16 Naměřené hodnoty – DC01 tloušťka plechu 2 mm

Mezera [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Lom
0,0	23,36	7683,6	215,4	328,9	30,0	Mimo svar
0,1	23,28	7693,2	217,3	330,5	37,5	Mimo svar
0,2	23,26	7702,4	213,5	331,1	30,0	Mimo svar



- Materiál DC01 – tloušťka plechu 3 mm
- U všech vzorků došlo k lomu mimo svar – dobrá kvalita svarů
- Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu

Graf č.3 Tahový diagram materiálu DC01 tloušťka 3 mm

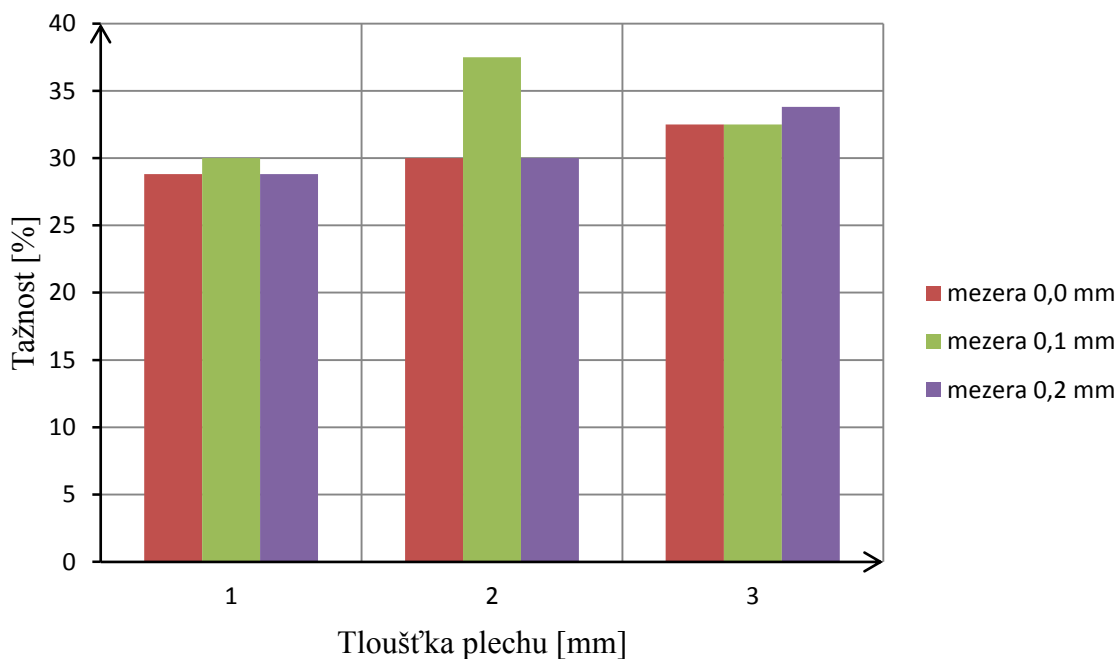


Tab. 17 Naměřené hodnoty – DC01 tloušťka plechu 3 mm

Mezera [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Lom
0,0	74,19	26117,2	213,0	352,0	32,5	Mimo svar
0,1	74,19	26023,2	208,4	350,8	32,5	Mimo svar
0,2	73,95	25938,4	215,4	350,8	33,8	Mimo svar

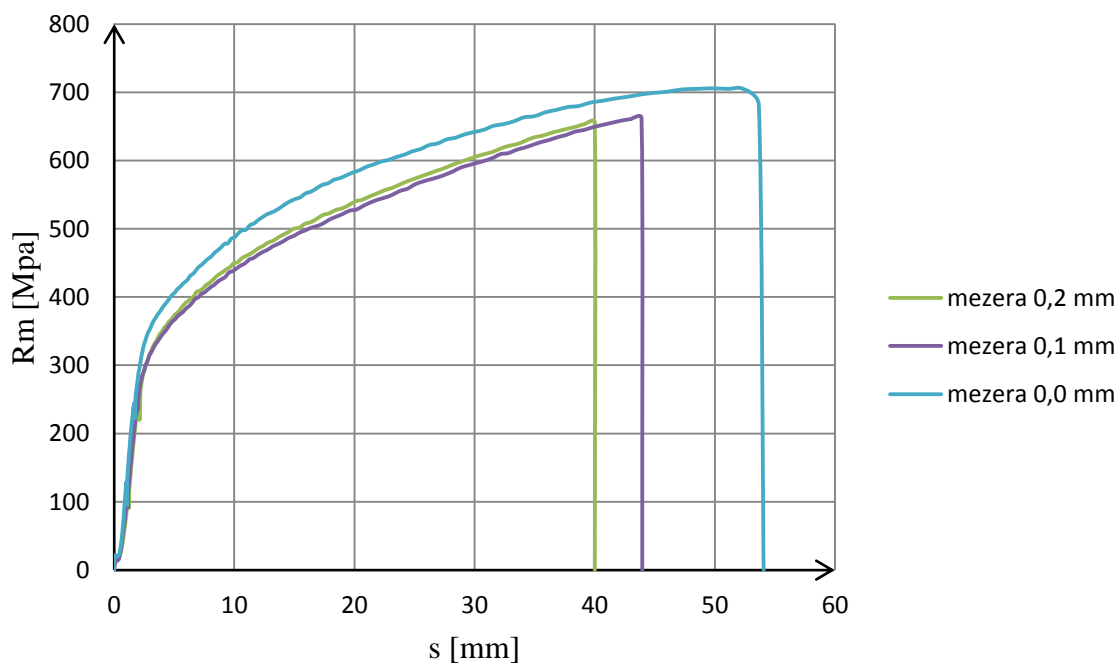
Z grafu č. 4 uvedeného níže je patrné, že mezera 0,1 mm má vliv na zvýšení tažnosti plechu tloušťky 1 a 2 mm. Ani větší mezera 0,2 mm, mezi svařovanými plechy, nesnížila tažnost materiálu DC01 na nižší hodnotu, než je tažnost základního materiálu. Protože všechny vzorky praskly mimo svar, hodnota tažnosti základního materiálu je rovna hodnotě tažnosti vzorku s mezerou 0,0 mm.

Graf č. 4 Střední hodnota tažnosti v závislosti na mezeře mezi svařovanými plechy



- Materiál X5CrNi18-10 – tloušťka plechu 1 mm
- U prvního vzorku s mezerou 0,0 mm došlo k lomu mimo svar – dobrá kvalita svarů, naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu
- U ostatních vzorků došlo k lomu ve svaru – špatná kvalita svaru

Graf č. 5 Tahový diagram materiálu X5CrNi18-10 tloušťka 1 mm

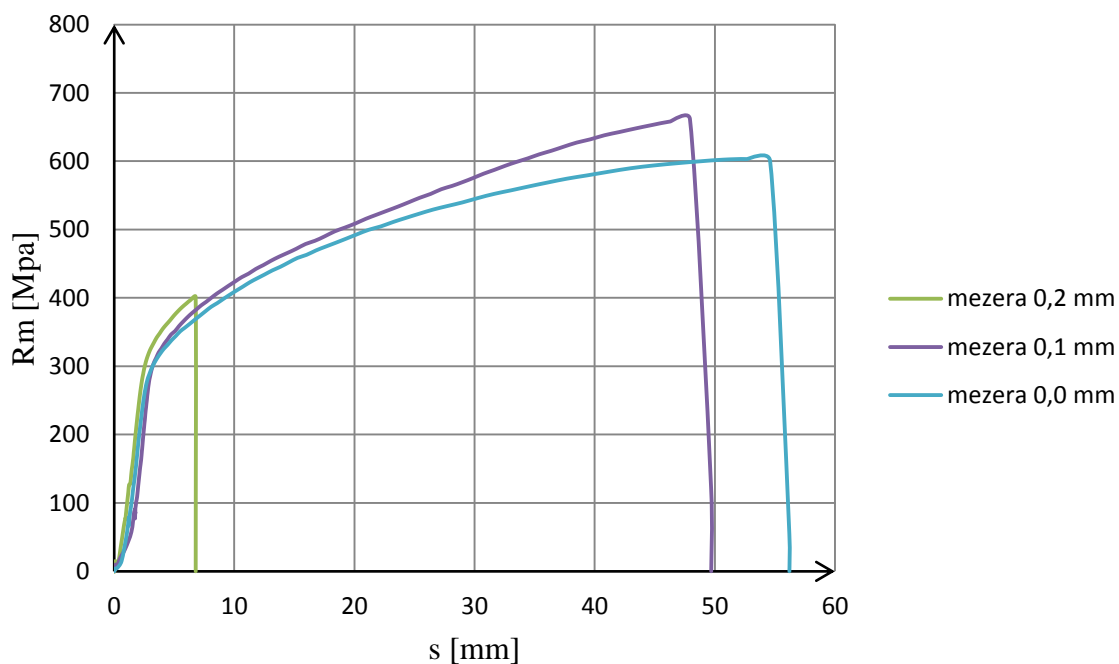


Tab. 18 Naměřené hodnoty – X5CrNi18-10 tloušťka plechu 1 mm

Mezera [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Lom
0,0	74,19	26117,2	213,0	352,0	32,5	Mimo svar
0,1	74,19	26023,2	208,4	350,8	32,5	Ve svaru
0,2	73,95	25938,4	215,4	350,8	33,8	Ve svaru

- Materiál X5CrNi18-10 – tloušťka plechu 2 mm
- U prvního vzorku s mezerou 0,0 mm došlo k lomu mimo svar – dobrá kvalita svarů
- Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu
- U ostatních vzorků došlo k lomu ve svaru – špatná kvalita svaru

Graf č. 6 Tahový diagram materiálu X5CrNi18-10 tloušťka 2 mm

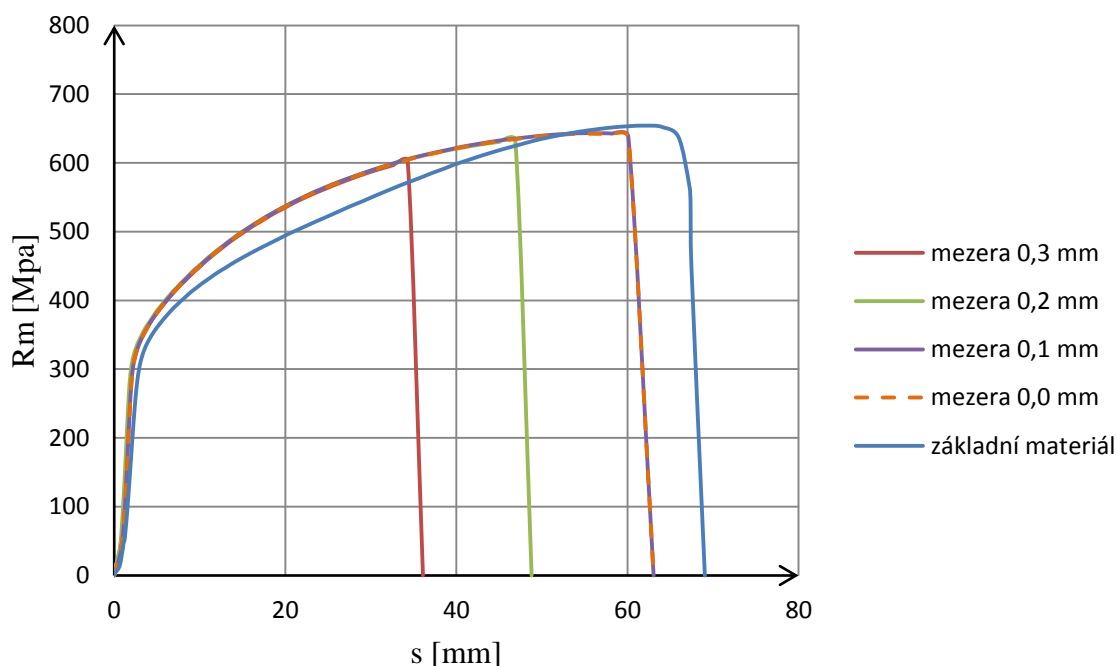


Tab. 19 Naměřené hodnoty – X5CrNi18-10 tloušťka plechu 2 mm

Mezera [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Lom
0,0	23,28	14060,0	297,3	604,0	48,8	Mimo svar
0,1	21,92	14520,8	311,1	662,5	40,0	Ve svaru
0,2	21,92	8831,2	319,2	402,9	40,6	Ve svaru

- Materiál X5CrNi18-10 – tloušťka plechu 3 mm
- U všech svařovaných vzorků došlo k lomu ve svaru – špatná kvalita svaru
- Pro zjištění vlastností základního materiálu je provedena zkouška z nesvařeného materiálu

Graf č. 7 Tahový diagram materiálu X5CrNi18-10 tloušťka 3 mm



Tab. 20 Naměřené hodnoty – X5CrNi18-10 tloušťka plechu 3 mm

Mezera [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	Lom
0,0	75,39	49337,6	321,6	654,4	45,0	Ve svaru
0,1	75,30	48444,0	323,1	643,4	48,8	Ve svaru
0,2	75,33	47766,8	323,4	634,1	35,0	Ve svaru
0,3	75,39	45989,2	323,0	610,0	27,5	Ve svaru
Základní materiál	74,67	48848,0	318,7	654,2	51,3	-

- Většina vzorků z materiálu X5CrNi18-10 praskla při zkoušce tahem ve svaru.
- Příčina lomů je bude objasněna v metalografickém šetření.

### 5.5 Metalografické šetření

Vzorky pro makrostrukturu a mikrostrukturu je třeba dokonale připravit. Nejprve je třeba nařezat vzorky na metalografické pile. Pro lepší manipulaci se vzorky zalisují za tepla do plastu. Poté následuje broušení, broušení je důležité pro odstranění tepelně ovlivněné vrstvy po dělení vzorků. Na obrázku níže je metalografické pracoviště pro přípravu vzorků.



Obr. 66 Vlevo – brousicí a lešticí stroj, vpravo – stroj na zalisování vzorků

Brousí se nejprve kotouči s malou zrnitostí, postupně až po největší zrnitost. Broušení je prováděno pod vodou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorků. Předposlední operací je leštění pomocí diamantové suspenze na vodní bázi DiaDuo-2.



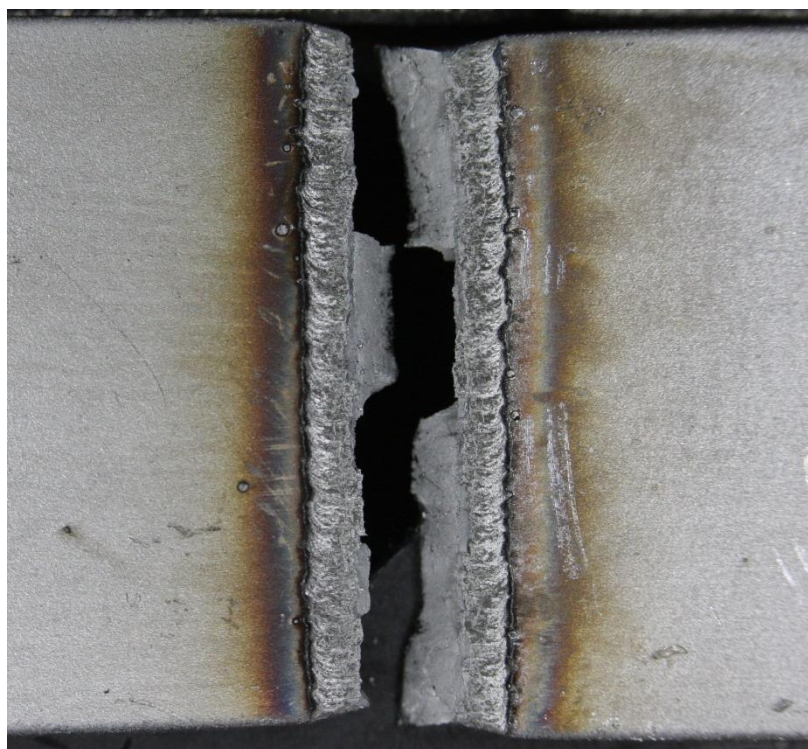
Obr. 67 Brousicí a lešticí kotouče

Poslední operací je leptání. Leptání slouží k odstranění povrchové vrstvy po leštění a zviditelnění struktury vzorku.



Obr. 68 Připravené metalografické vzorky






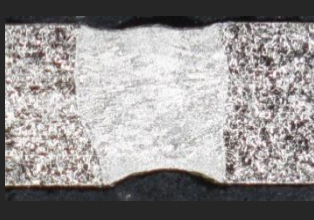

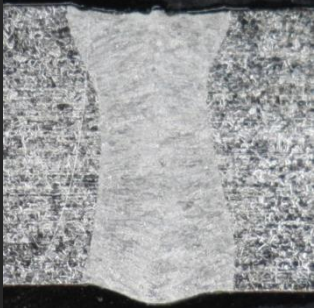

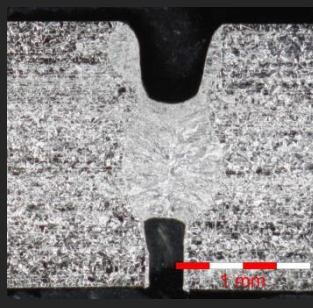




Obr. 69 Makrostruktura lomu zkušebního tělesa X5CrNi18-10, tl. 3 mm, mezera 0,2 mm

Tab. 21 Makrostruktur materiálu DC01

Tloušťka [mm]	Mezera [mm]		
	0,0	0,1	0,2
1			
2			
3			

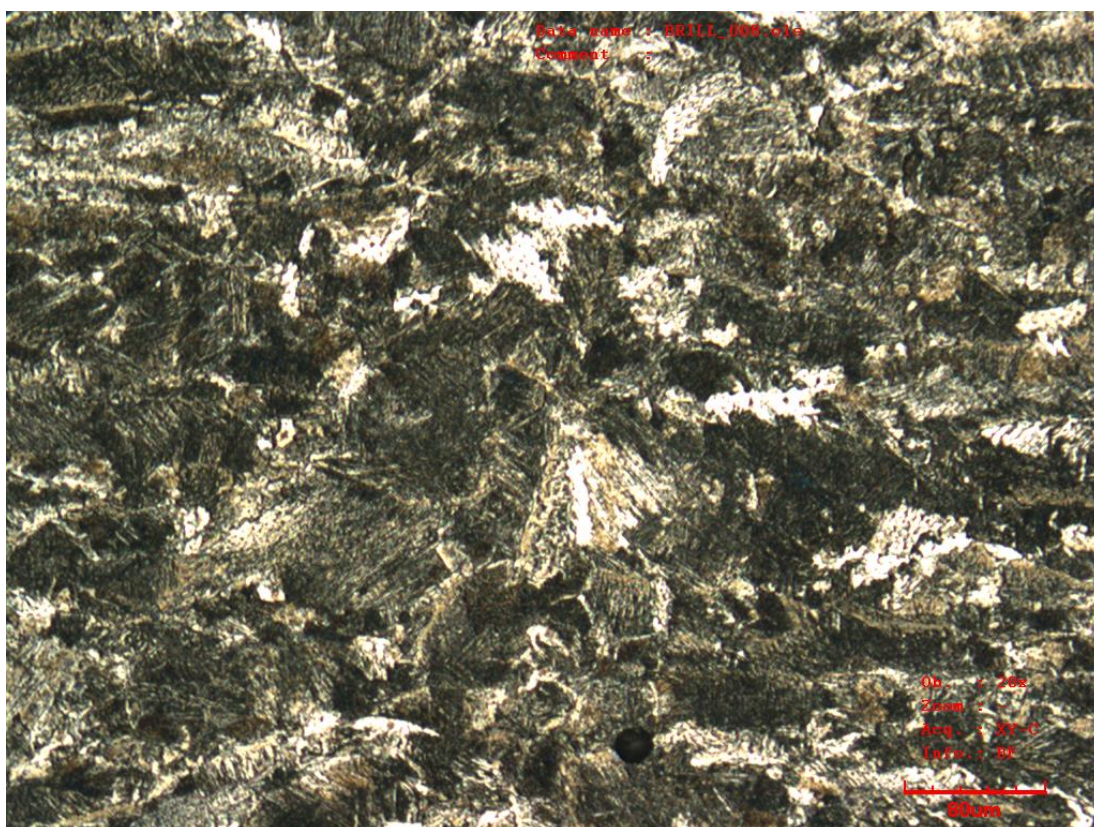
Na snímcích makrostruktury je patrné snižování tloušťky svarů se zvětšující se mezerou mezi svařovanými plechy. Objevují se vady svaru, nejčastěji nedostatečné překrytí, propadlý kořen a plynové bubliny, které jsou typické pro laserové svařování.

Tab. 22 Makrostruktura materiálu X5CrNi18-10

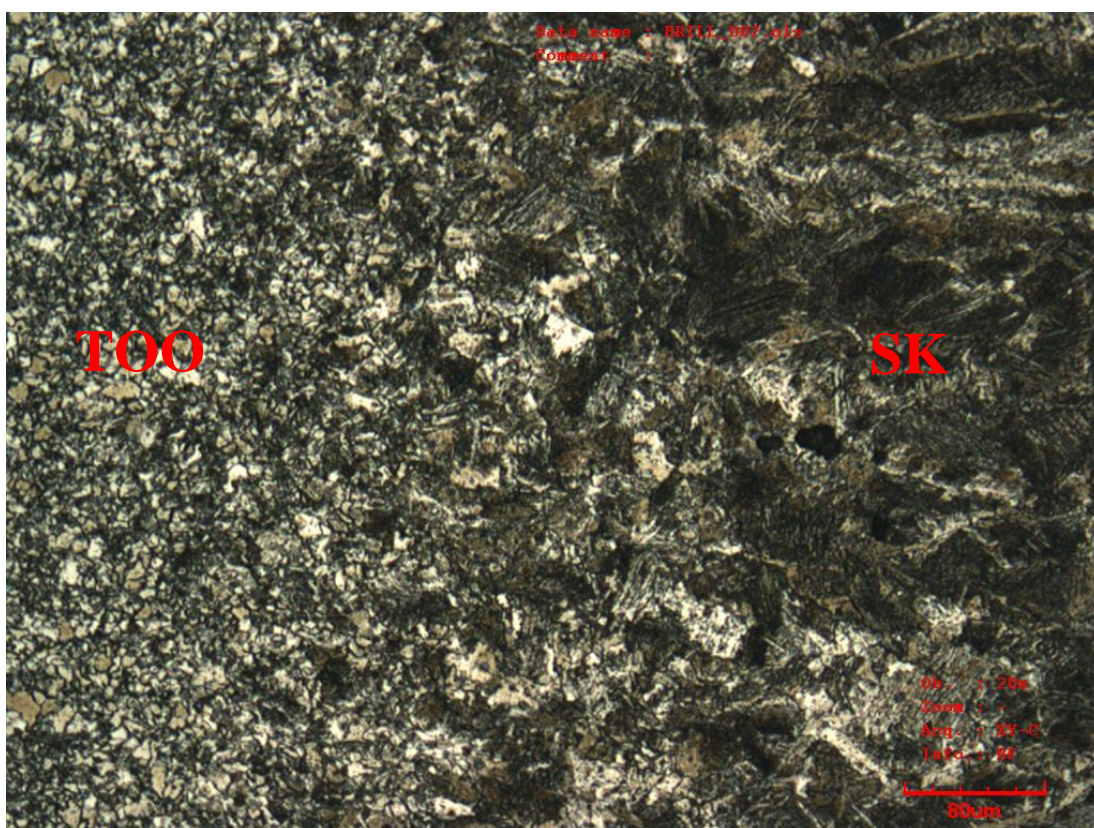
Tloušťka [mm]	Mezera [mm]		
	0,0	0,1	0,2
1			
2			
3			
3	Mezera [mm]		
	0,3		
3			

Na snímcích makrostruktury je patrné snižování tloušťky svarů se zvětšující se mezerou mezi svařovanými plechy. Objevují se vady svaru, jako je nedostatečné překrytí, propadlý kořen a zúžení kořene svaru.



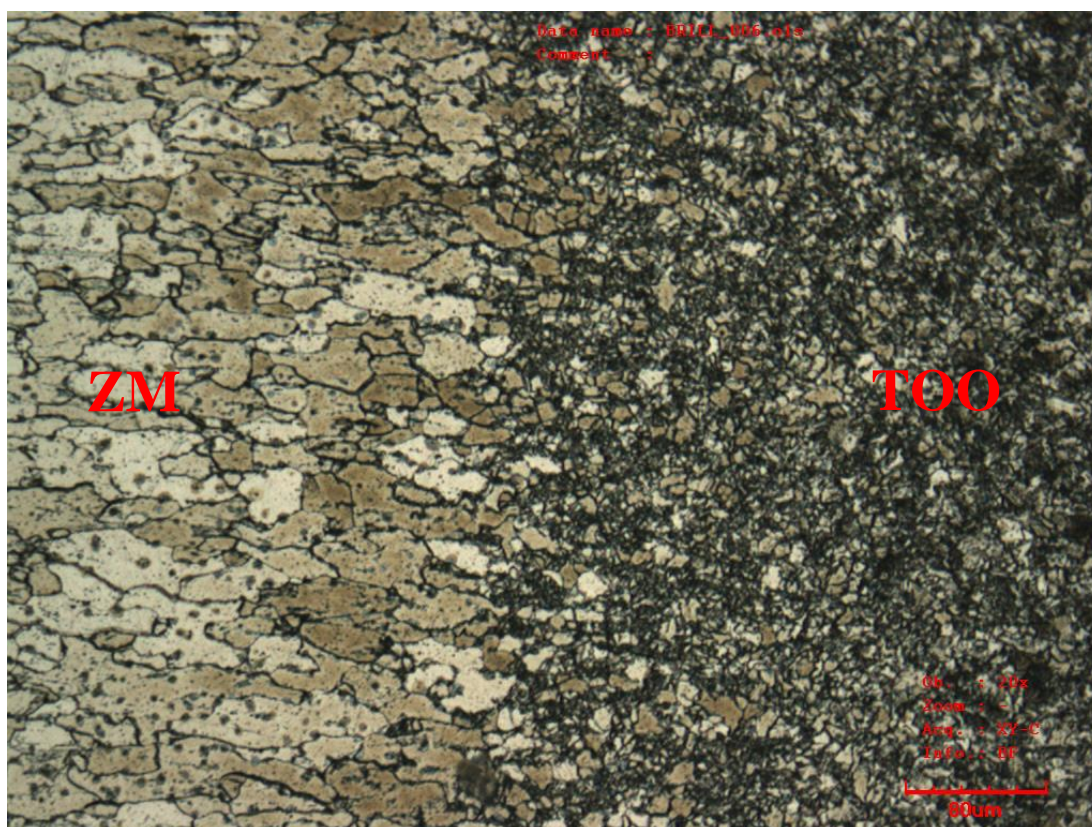


Obr. 70 Mikrostruktura svarového kovu materiálu DC01

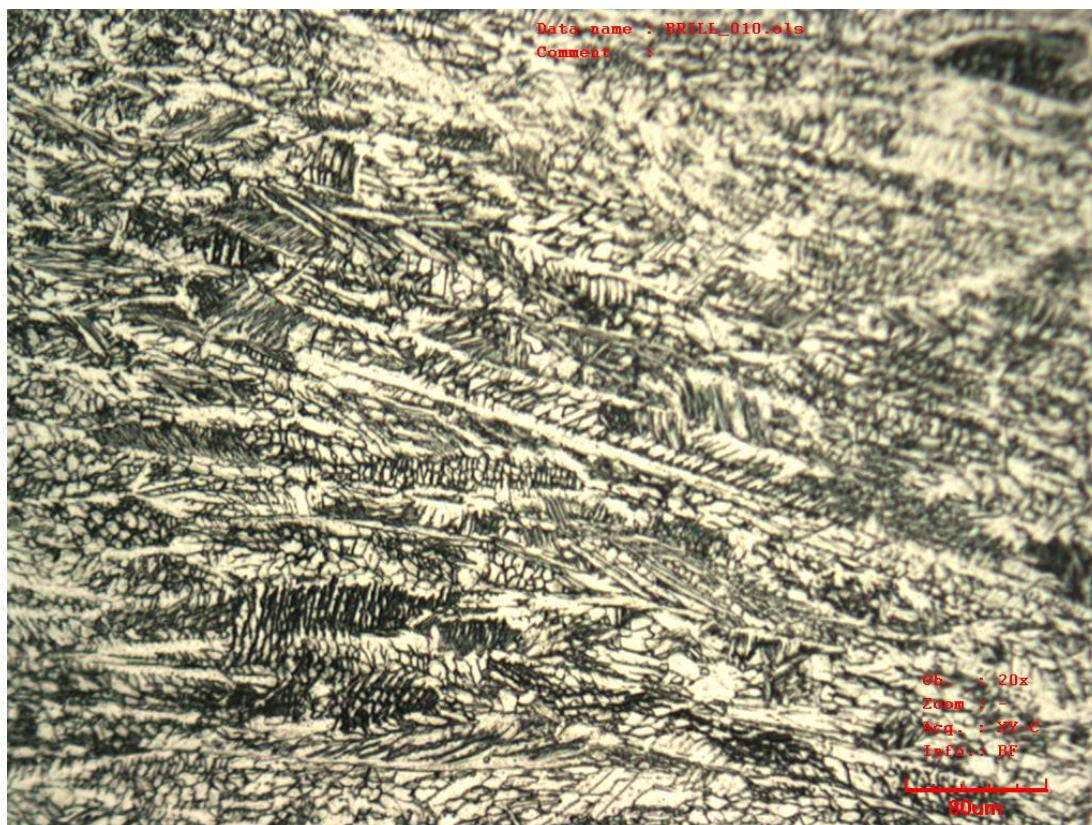


Obr. 71 Mikrostruktura rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti – DC01



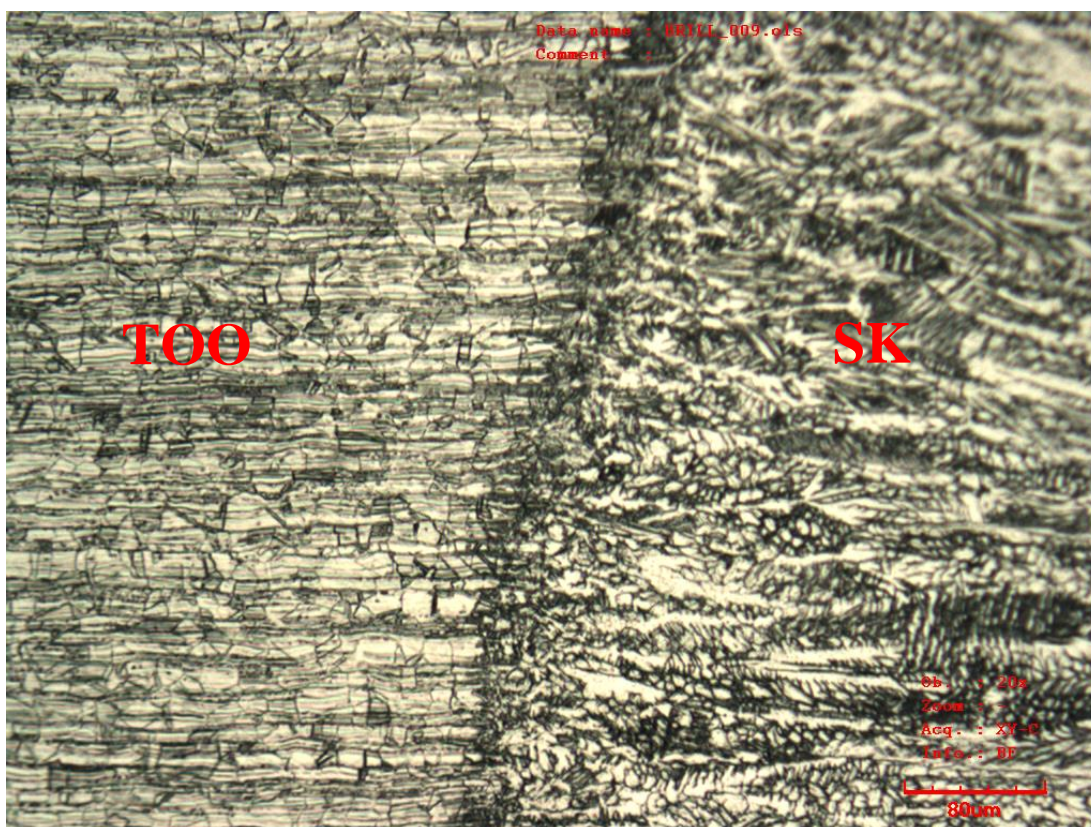


Obr. 72 Mikrostruktura rozhraní základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti – DC01



Obr. 73 Mikrostruktura svarového kovu materiálu X5CrNi18-10





Obr. 74 Mikrostruktura rozhraní TOO a základního materiálu – X5CrNi18-10

Na obr. 74 je vidět změna zrnitosti v rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny mikrostrukturou austenitu a  $\delta$ -feritu.

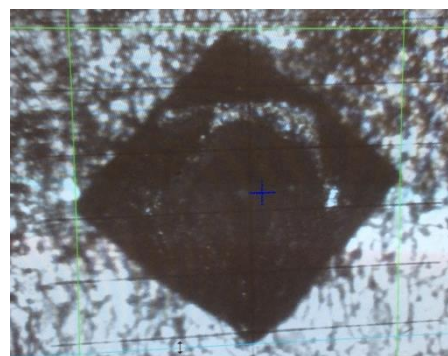
Častým problémem při použití korozivzdorných ocelí je zhoršení houževnatosti a odolnosti proti korozi v důsledku působení vysoké teploty. Jedna z nejrozšířenějších intermedialních fází je sigma fáze, která je tvrdá, křehká a nemagnetická.

Vyloučením sigma fáze v oceli vzrůstá křehkost, tvrdost, pevnost a mez kluzu, klesá tažnost a kontrakce při zkoušce tahem za normální teploty, a to tím výrazněji, čím více se sigma fáze vyloučí.

V oblasti rozhraní dochází k tvorbě těchto intermetalických fází, což má za následek lom ve svaru při zkoušce tahem.

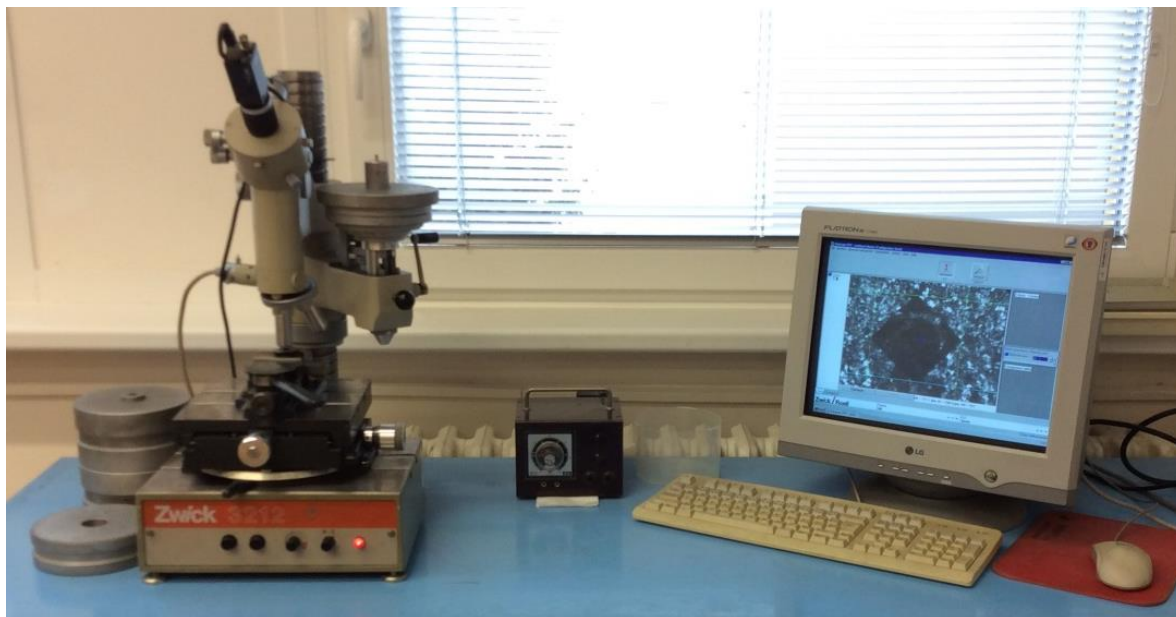
### 5.6 Měření tvrdosti dle Vickerse [25]

Měření tvrdosti je provedeno na dvou vzorcích materiálu DC01 a na dvou vzorcích materiálu X5CrNi18-10. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny níže. Měření je provedeno na Vickersově tvrdoměru značky Zwick. Na objektivu tvrdoměru je připevněna CCD kamera, kterou je snímán povrch vzorku. Obraz vtisku je převeden do počítače, kde se následně vyhodnocuje tvrdost pomocí softwaru testXpert. Doba zatížení vzorku je 12 s. Vtisky mají rozteč 0,5 mm, aby nedošlo k vzájemnému ovlivnění. Měření tvrdosti je provedeno přes celý vzorek. Je



Obr. 75 Vtisk na rozhraní SK a TOO

měřena tvrdost základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu.



Obr. 76 Pracoviště pro měření tvrdosti, nalevo tvrdoměr Zwick 3212

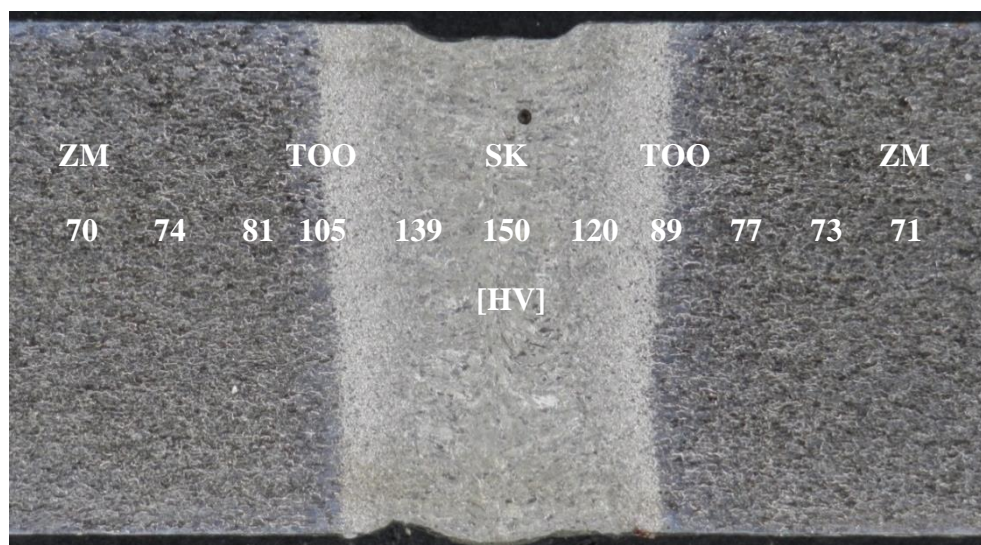
Tab. 23 Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu DC01, tloušťka plechu 3 mm

Mezera 0,0 mm		Mezera 0,2 mm	
Číslo vtisku	Tvrdost [HV]	Číslo vtisku	Tvrdost [HV]
1	70	1	70
2	74	2	74
3	81	3	88
4	105	4	104
5	139	5	127
6	150	6	160
7	120	7	127
8	89	8	96
9	77	9	81
10	73	10	76
11	71	11	72

Čím blíže svarovému kovu, tím se tvrdost jednotlivých struktur materiálu DC01 se zvyšuje. Tvrdost základního materiálu je 70 HV. Tvrdost ve svarovém kovu je více než dvojnásobná, dosahuje hodnoty 160 HV.

Při svařování nelegovaných ocelí je třeba počítat s tím, že uhlík v tepelně ovlivněné oblasti způsobuje zvýšení tvrdosti. Jako maximální hodnota tvrdosti se připouští 350 HV. Hodnota tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti materiálu DC01 je v pořádku.





Obr. 77 Makrostruktura s hodnotami tvrdosti, DC01, tloušťka 3mm, mezera 0,0 mm

Tab. 24 naměřené hodnoty tvrdosti materiálu X5CrNi18-10, tloušťka plechu 3 mm

Mezera 0,0 mm		Mezera 0,1 mm	
Číslo vtisku	Tvrdost [HV]	Číslo vtisku	Tvrdost [HV]
1	120	1	122
2	122	2	123
3	124	3	125
4	112	4	131
5	122	5	131
6	133	6	136
7	133	7	137
8	126	8	135
9	126	9	138
10	124	10	131
11	127	11	128
12	127	12	129
13	125	13	125
14	125	14	125
15	123	15	122

Tvrdost jednotlivých struktur materiálu X5CrNi18-10 se zásadně nemění. Tvrdost základního materiálu je přibližně 122 HV, nejvyšší tvrdost byla naměřena ve svarovém kovu, 138 HV.

## 6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [43], [48]

Protože nebyla zadána konkrétní součást k řešení, není možné stanovit přesnou ekonomiku. Obecně lze říci, že zvětšující se mezera mezi svařovanými plechy má za následek nevyhovující svarový spoj. Proto je při technologii svařování plechů na tupo nutné dbát na preciznost přípravků.

Přesné slícování plechů vyžaduje často složitý přípravek, který musí mít dostatečnou pevnost vůči silám vznikajícím vlivem svařování. Přípravky využívají mechanické nebo pneumatické upínače. Druh ovládání upínačů má významný vliv na cenu přípravku a čas zakládání dílu.

Upínací přípravky určené do svařovacích pracovišť pro automobilový průmysl vyžadují větší přesnost svařování než přípravky pro jiný průmysl. Z toho důvodu jsou všechny části přípravku seřiditelné ve třech osách pomocí seřizovacích podložek. Součástí přípravku je automatická kontrola přítomnosti všech dílů pomocí indukčních nebo jiných typů čidel. Dále čidla zavření a otevření upínačů. Musí být zajištěna správná poloha jednotlivých dílů svařence při svařování včetně jejich nezaměnitelnosti při zakládání nebo upínání každého z dílů. Mezi přednosti přípravků patří:

- snadné zakládání dílů,
- minimální deformace dílů po svaření,
- dosah a místo pro svařovací hlavu robota,
- snadné vyjmutí sestavy svařence.



Obr. 78 Svařovací přípravky [48]

Je třeba uvědomit si, že složitě přípravek bude mít významný vliv na výslednou cenu technologie. Cenu přípravku je možné snížit použitím mechanických upínačů, místo pneumatických, ale prodlouží se tím vedlejší čas výroby. Složitější a delší manipulace bude mít na výslednou cenu také vliv.

Druhou variantou, jak ovlivnit proces svařování laseru, je aktivní řízení. Jedná se o automatické zacílení výstupního paprsku. Trajektorie svaru není pevně stanovená, výstupní paprsek laseru je automaticky korigován. Tato varianta je ovšem také cenově náročná.

Využití technologie svařování plechů na tupo laserem je možné, ale cenu technologie významně ovlivní složitě přípravek nebo aktivní řízení laserového paprsku.

## 7 ZÁVĚRY

Předmětem diplomové práce je studium vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru. Pro experiment byl vybrán materiál DC01 a korozivzdorná ocel X5CrNi18-10. Plechy o různých tloušťkách byly svařeny vláknovým optickým laserem Yb-YAG a podrobeny mechanickým zkouškám. Maximální mezera mezi svařovanými plechy je 0,3 mm, tato hodnota je dána průměrem vycházející svazku Yb-YAG laseru. Svařovací parametry zůstávají konstantní v závislosti na mezeře mezi svařovanými plechy, mění se pouze podle tloušťky plechu a materiálu. Svařovací parametry byly zvoleny na základě zkušeností se svařováním daných materiálů na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Vzorky byly posuzovány na zkoušku tahem, tvrdost dle Vickerse, makrostrukturu a mikrostrukturu.

Vyhodnocením provedených zkoušek materiálu DC01 bylo zjištěno:

- u všech vzorků tahové zkoušky vznikl lom mimo svar = dobrá kvalita svarů,
- zaznamenána vyšší tažnost při mezeře 0,1 mm u tloušťky plechu 1 a 2 mm,
- se zvětšující se mezerou mezi svařovanými plechy se snižuje tloušťka svaru, nejčastější svarová vada je nedostatečné překrytí a propadlý svar,
- vyhovující nárůst tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti,  $160 \text{ HV} \leq 350 \text{ HV}$ .

Experimentem bylo zjištěno, že mezera mezi svařovanými plechy do 0,2 mm, má vliv na tloušťku a vzhled svaru, ale nemá negativní vliv na mechanické vlastnosti materiálu DC01.

Vyhodnocením provedených zkoušek materiálu X5CrNi18-10 bylo zjištěno:

- se zvětšující se mezerou mezi svařovanými plechy se snižuje tloušťka svaru, objevují se vady svaru, jako je nedostatečné překrytí, propadlý kořen a zúžení kořene svaru,
- tvrdost se ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti zásadně nemění,
- u většiny vzorků tahové zkoušky vznikl lom ve svaru = špatná kvalita svaru,
- mechanické vlastnosti materiálu X5CrNi18-10 jsou ovlivněny mikrostrukturou austenitu a  $\delta$ -feritu. Na rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu je viditelná změna zrnitosti, v této oblasti dochází k tvorbě intermetalických fází, jako je sigma fáze, která je tvrdá, křehká a nemagnetická, což má za následek lom ve svaru při zkoušce tahem.

Experimentem bylo zjištěno, že mezera mezi svařovanými plechy má negativní vliv na mechanické vlastnosti materiálu X5CrNi18-10, zapříčiněné vznikem intermetalických fází na rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti.

Na základě experimentu se doporučuje do svařovacího postupu WPS uvést hodnotu, maximální mezery slícovaných dílů, do 0,2 mm pro tloušťku plechu do 3 mm.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Absorption by wavelength. *Fabricatingandmetalworking* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.fabricatingandmetalworking.com/wp-content/uploads/2012/09/Absorption\\_by\\_wavelength-1.jpg](http://www.fabricatingandmetalworking.com/wp-content/uploads/2012/09/Absorption_by_wavelength-1.jpg)
2. Automation. *Limitstogrowth* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.limitstogrowth.org/?s=automation+OR+robot+jobs&submit.x=0&submit.y=0&submit=Search>
3. DC01. *Pasovaocel* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.pasovaocel.cz/vyro\\_kla.htm](http://www.pasovaocel.cz/vyro_kla.htm)
4. Hlavní typy laseru používaných v průmyslu. *Lao* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
5. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Mega-blog* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
6. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-858-6795-8.
7. Kontinuální vláknový laser. *Lintech* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/kontinualni-vlaknovy-laser>
8. Korozivzdorná ocel. *Ferona* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=30464>
9. Korozivzdorná ocel. *Ferona* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=24466>
10. Korozivzdorné oceli. *Heyman* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische\\_angaben/korozivzdorne\\_oceli.pdf?f=1](https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische_angaben/korozivzdorne_oceli.pdf?f=1)
11. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
12. Laser. *Westartmedica* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.westartmedica.cz/laser.html>
13. Laser. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
14. Laser cutting. *Thailandlaser* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.thailandlaser.com/laser-machine/laser-cutting/cs2513-yag500x-24>
15. Laser welding. *Awl* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.awl.nl/cz/technologies/laser\\_welding/laser-welding](http://www.awl.nl/cz/technologies/laser_welding/laser-welding)
16. Laserová technologie. *Mmspektrum* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
17. Laserové kalení. *Ks-kurim* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.ks-kurim.cz/laserove-kaleni/>

18. Laserové kalení. *Techmagazin* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/1505>
19. Laserové navařování. *Arc-robotics* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.arc-robotics.cz/laserove-navarovani.html>
20. Laserové popisování. *Lintech* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-popisovani>
21. Laserové řezání. *Jontech* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://jontech.cz/cs/technologie-a-sluzby/laserove-rezani/>
22. Laserové svařování. *Lao* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
23. Laserové svařování. *Lao* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-a-navarovani-86>
24. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
25. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7185-3.
26. Mechanické vlastnosti ocelí. *Západočeská univerzita Plzeň* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://old.fst.zcu.cz/\\_files\\_web\\_FST/\\_SP\\_FST\(SVOC\)/\\_2010/\\_sbornik/PapersPdf/Mgr/Martinkova\\_Jana.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2010/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Martinkova_Jana.pdf)
27. MIG/MAG. *Intermarket* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://intermarket.otwarte24.pl/581,Spawanie-metoda-MIGMAG-The-technology-of-welding>
28. Navařování laserem. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_navarovani\\_laserem\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__navarovani_laserem__mrna.pdf)
29. Nekonvenční metody obrábění. *Mmspektrum* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
30. Nerez. *Koenigfrankstahl* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.koenigfrankstahl.sk/produkty/nerez/>
31. Obloukové svařování. *Mechmes* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-15\\_obloukovesvarovanimigmag.pdf](http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-15_obloukovesvarovanimigmag.pdf)
32. Optika. *Narran* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.narran.cz/znse-optika/>
33. Princip laseru. *Mmspektrum* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
34. Průmyslové lasery pro svařování. *Upol* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova\\_prumyslove\\_lasery\\_pro\\_svarovani.pdf](https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf)

35. Průmyslové roboty. *Abb* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
36. Přehled svařování. *Cvut* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf)
37. Pulzní vláknový laser. *Lintech* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/pulzni-vlaknovy-laser>
38. Robotics industry. *Scmp* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.scmp.com/lifestyle/technology/science-research/article/1754165/robotics-industry-booming-guangdong-insiders>
39. Řezání laserem. *Chps* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/kvalita-a-cena>
40. Řezání laserem. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_rezani\\_\\_laserem\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani__laserem_2013__mrna.pdf)
41. Svarové vady. *Cws-anb* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
42. Svařování laserem. *Istrojirenstvi* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=svarovani-laserem-posledni-trendy&id=20>
43. Svařování laserem. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_svarovani\\_\\_laserem\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani__laserem_2013__mrna.pdf)
44. Světelný zdroj do domácnosti. *Odbornecasopisy* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/jak-vybrat-spravny-svetelny-zdroj-do-domacnosti-cast-1--873>
45. Tailoredblanks. *Automotive* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com/tailoredblanks/1864/1865>
46. Tvrdost Vickers. *Converter* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>
47. Ulat. *Cvut* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ulat\\_09.pdf](http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ulat_09.pdf)
48. Upínací přípravky pro svařování. *Del* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.del.cz/upinaci-pripravky-pro-svarovani/>
49. Uranit. *Sbarvy* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://uranit.wz.cz/view.php?page=sbarvy>
50. Vickers. *Eluc.kr-olomoucky* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1105>
51. WD50. *Ipgphotonics* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.ipgphotonics.com/products\\_WD50.htm](http://www.ipgphotonics.com/products_WD50.htm)

52. YbYAG. *What is nanotechnology* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://what-is-nanotechnology.com/7Y3Al5O12-NdYAG-CrYAG-ErYAG-YbYAG-Ce-Tm-Ho-garnet.htm>
53. Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
54. Základy laserové techniky. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_zaklady\\_laserove\\_techiky\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf)
55. Zkoušky tvrdosti. *Sssebrno* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky_tvrlosti.pdf)
56. Značení a gravírování kovových materiálů. *Lao* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89/znaceni-a-gravirovani-kovovych-materialu-91>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
Ag	[-]	stříbro
Al	[-]	hliník
Au	[-]	zlato
Be	[-]	beryllium
ČSN	[-]	česká státní norma
CO <sub>2</sub>	[-]	oxid uhličitý
Cr	[-]	chrom
Cu	[-]	měď
E	[-]	energie
EN	[-]	evropská norma
Fe	[-]	železo
IR	[-]	infrared
ISO	[-]	international organization for standardization
Laser	[-]	light amplification by stimulated emission of radiation
LED	[-]	light emitting diode
MAG	[-]	metal active gas
MIG	[-]	metal inert gas
Mo	[-]	molybden
Mn	[-]	mangan
Ni	[-]	nikl
Nd	[-]	neodym
Pd	[-]	palladium
Pt	[-]	platina
RTG	[-]	rentgenové záření
SK	[-]	svarový kov
Tab.	[-]	tabulka
Te	[-]	tellur
Ti	[-]	titan
TIG	[-]	tungsten inert gas
TOO	[-]	tepelně ovlivněná oblast
UV	[-]	ultraviolet
W	[-]	wolfram
WIG	[-]	wolfram inert gas
YAG	[-]	yttrium aluminium granát
Yb	[-]	ytterbium
ZM	[-]	základní materiál
atd.	[-]	a tyk dále
č.	[-]	číslo
max.	[-]	maximálně
např.	[-]	například

Zkratka	Jednotka	Popis
obr.	[-]	obrázek
tzv.	[-]	tak zvaný

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
$D_{SPOT}$	[mm]	průměr vycházejícího paprsku
$D_{VLÁKNA}$	[mm]	průměr vlákna
$E$	[Mpa]	modul pružnosti v tahu
$F$	[N]	síla vtlačování
$F_e$	[N]	zatížení na mezi kluzu
$F_m$	[N]	maximální zatížení
$S_0$	[m <sup>2</sup> ]	výchozí průřez tyče
$S_u$	[m]	konečný průřez tyče
$b_0$	[m]	šířka zkoušené délky vzorku
$d$	[μm]	úhlopříčka vtisku
$d_1$	[μm]	průměr vtisku v úhlopříčce
$d_2$	[μm]	průměr vtisku v úhlopříčce
$f_{fok}$	[mm]	ohnisková vzdálenost fokusační čočky
$f_{kol}$	[mm]	ohnisková vzdálenost kolimační čočky
$l_0$	[m]	výchozí měřená délka tyče
$l_u$	[m]	konečná měřená délka tyče
s	[m]	tloušťka plechu
$\varepsilon$	[%]	deformace
$\sigma$	[Mpa]	napětí

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN

## Příloha č.1    **Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/**

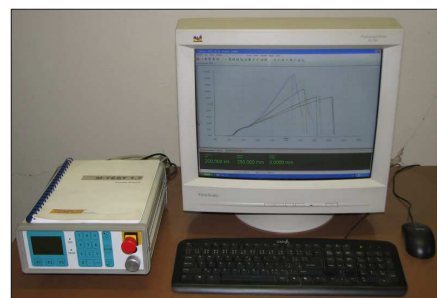
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1 \%$  odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60